

**EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE REVENIDO EN LA  
MICROESTRUCTURA Y EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO**

**AISI 4140**



**LUIS CARLOS VILORIA RIVAS**

**LUIS FERNANDO BOHÓRQUEZ PETRO**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA MECÁNICA**

**MONTERÍA, CÓRDOBA**

**2016**

**EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE REVENIDO EN LA  
MICROESTRUCTURA Y EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO  
AISI 4140**

**LUIS CARLOS VILORIA RIVAS  
LUIS FERNANDO BOHÓRQUEZ PETRO**

**Trabajo de grado presentado, en la modalidad de Trabajo de investigación como  
parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Mecánico.**

**Director (s):**

**LUIS ARMANDO ESPITIA SANJUÁN, Ph.D**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA MECÁNICA**

**MONTERÍA, CÓRDOBA**

**2016**



**Responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

**Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

*A Dios por ser guía y creador de mi camino.*

*A mis padres por comprensión y amor.*

*A mis hermanos por creer siempre en mí, ayudándome en los momentos claves.*

*A mi Universidad por ser mi segundo hogar y lugar de crecimiento.*

*A mis profesores por su tiempo, conocimiento, paciencia y tolerancia.*

*A mis compañeros por su compañía y a todas las demás personas que de una u otra manera ayudaron a que esta meta se hiciera tangible.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Principalmente a Dios por darnos la perseverancia y las ganas para seguir adelante en los momentos complicados, a nuestros padres quienes a lo largo de nuestras vidas nos han apoyado y motivado en nuestra formación académica, creyeron en nosotros en todo momento y no dudaron de nuestras capacidades.*

*A nuestros profesores y en especial al ingeniero Demóstenes Durango Álvarez y al ingeniero Luis Armando Espitia Sanjuán a quienes les debemos gran parte de nuestros conocimientos, gracias a su paciencia y enseñanza, y finalmente un eterno agradecimiento a la Universidad de Córdoba por abrirnos sus puertas y prepararnos tanto en lo intelectual como en lo moral para desempeñar un mejor papel en la sociedad y para nuestras familias.*

## Tabla de contenido

RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
1. INTRODUCCIÓN .....	15
2. OBJETIVOS .....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	16
2.2 OBJETIVO ESPECIFICO .....	16
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
3.1 ACEROS .....	17
3.1.1. Aceros de bajo carbono .....	19
3.1.2. Aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA) .....	19
3.1.3 Aceros de medio carbono.....	19
3.1.4 Acero de alto carbono .....	20
3.1.5 Aceros alta aleación .....	20
3.1.6. Aceros de herramientas.....	20
3.2 NOMENCLATURA DE LOS ACEROS.....	21
3.3 MICROESTRUCTURA DEL ACERO .....	23
3.3.1 Ferrita .....	24
3.3.2 Cementita .....	25
3.3.3 Perlita.....	26
3.3.4 Austenita.....	27
3.3.5 Bainita .....	27
3.3.6. Martensita .....	29
3.4 ACERO AISI 4140 .....	33
3.4.1 Características.....	33
3.4.2 Aplicaciones .....	34
3.5 RECOCIDO .....	37
3.5.1 Recocido completo .....	37
3.5.2 Recocido intercrítico.....	38
3.5.3 Recocido subcrítico.....	38
3.5 NORMALIZADO.....	39



3.6	AUSTENIZADO .....	41
3.6.1	Temple .....	41
3.6	REVENIDO .....	45
3.7	ENSAYO DE TENSIÓN .....	47
4.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	51
4.1	MATERIALES.....	51
4.2	TRATAMIENTO TÉRMICO.....	51
4.3	CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL .....	52
4.4	ENSAYOS DE TENSIÓN .....	53
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
6.	CONCLUSIONES .....	68
7.	RECOMENDACIONES .....	70
8.	BIBLIOGRAFIA .....	71

## **INDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1: Clasificación AISI-SAE de los acero.....</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 2: composición química del acero AISI 4140.....</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 3: Valores de esfuerzo último y de dureza del acero AISI 4140en función de la temperatura de revenido.....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 4 Composición química de los químicos utilizados sobre las muestras.....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 5: Composición química nominal y medida por espectroscopia de emisión óptica en el acero AISI 4140, porcentajes en peso.....</b>	<b>52</b>
<b>Tabla 6: Variación del Esfuerzo último en función de la temperatura de revenido.....</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 7: Propiedades mecánicas calculadas y teóricas.....</b>	<b>66</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1: Clasificación de los aceros de acuerdo al porcentaje de elementos aleantes.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 2: Diagrama hierro-carbono.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 3: Micrografía de la Ferrita. Fuente: Análisis Metalográfico y Termoquímico de Aceros y Fundiciones.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 4: Cementita en forma de red clara en los bordes de los grano.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 6: Micrografía de la Austenita. Fuente: Análisis Metalográfico y Termoquímico de Aceros y Fundiciones. ....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 7: Micrografía de Bainita que contiene agujas muy finas de Cementita.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 8: Micrografía de la martensita. Fuente: Pero-Sanz Elorz (2006).....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 9: Tenacidad en función de la temperatura de revenido para un acero al Carbono de baja aleación. ....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 10: Máquina de ensayos de tensión.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 11: Encuellamiento.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 12: Diagrama esfuerzo deformación en materiales dúctiles. ....</b>	<b>50</b>

<b>Figura 13: Especímenes Estándares para probetas redondas. Norma ASTM E8.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 14 Microestructura del acero AISI 4140 en estado de entrega.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 15: Microestructuras del acero AISI 4140 a diferentes temperaturas de revenido.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 16: Variación de la dureza en función de la temperatura de revenido. ....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 17: Curvas de esfuerzo normal en función de la deformación unitaria del acero AISI 4140 en estado de entrega y las diferentes temperaturas de revenido .....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 18: Esfuerzo de fluencia y esfuerzo último en función de la temperatura de revenido. Fuente: Autores.....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 19: porcentajes de elongación y de reducción de área en función de la temperatura de revenido. ....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 20: Resiliencia y tenacidad en función de la temperatura de revenido. .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 21: Tipos de falla producidos en las probetas durante los ensayos de tensión, a) Fractura dúctil b) fractura frágil. ....</b>	<b>69</b>

## RESUMEN

Muestras del acero AISI 4140 fueron templadas y revenidas a cinco temperaturas diferentes con el objetivo de evaluar el efecto de la temperatura de revenido en la microestructura y en los esfuerzos últimos, límite elástico, dureza, tenacidad, resiliencia entre otros. Se verificó la composición química del acero usando espectrometría de emisión óptica. La microestructura del acero antes y después de los tratamientos térmicos se evaluó a partir de microscopía óptica y medidas de dureza en escala Rockwell C. Se determinaron propiedades mecánicas a partir de curvas de esfuerzo normal en función de la deformación unitaria obtenidas en ensayos de tensión acorde a la norma ASTM E8. Los resultados de espectroscopia de emisión óptica confirmaron que la composición química del acero utilizado en esta investigación corresponde al acero AISI 4140. La microestructura en estado de entrega está constituida por martensita revenida en forma de ripas, microestructura típica de un acero de medio carbono templado y revenido. La microestructura obtenida para las temperaturas de revenido está constituida por martensita revenida y carburos posiblemente de hierro tipo  $Fe_3C$ . La dureza disminuyó con el aumento de la temperatura de revenido. El revenido a diferentes temperaturas modificó fuertemente las propiedades mecánicas del acero AISI 4140.

**Palabras Clave:** Microestructura, Temple y Revenido, Propiedades Mecánicas, Ensayo de tensión.

## **ABSTRACT**

In order to evaluate the effect of tempering temperature on the microstructure and on the mechanical properties of AISI 4140 steel, specimens of the steel were austenized at 850°C during 1 hour and quenched in water, subsequently, were tempered at 200°C, 300°C, 400°C, 500°C and 600°C and aired cooled to room temperature. The chemical composition of the steel was verified by optical emission spectroscopy and the microstructure before and after heat treatments were characterized by means of optical microscopy and Rockwell C hardness measurements. In addition, tensile tests were carried out in order to determine some mechanical properties from the stress – strain curve according to the ASTM E8 standard. The chemical results showed that the steel fulfilled the composition ranges defined in the AISI 4140 standard. The microstructure of the steel was composed of tempered martensite and iron carbides. The hardness decreased with the increase on tempering temperature. The tempering temperature strongly modified the mechanical properties of AISI 4140 steel.

**Keywords:** AISI 4140 steel, Quenching, Tempering, Microstructure, Mechanical Properties, Tensile Test.

## 1. INTRODUCCIÓN

Según Shackelford (1992) más del 90 % del peso de los materiales metálicos que usa la humanidad son aleaciones ferrosas. Estas aleaciones son una gran familia de materiales de ingeniería con un enorme número de microestructuras y propiedades que, al día de hoy, seguimos investigando.

El acero es, como se mencionó anteriormente, tal vez el material más ampliamente utilizado, muy importante en estructuras de todo tipo por las características propias de él. La rapidez y aumento de las construcciones, su relativo bajo costo y sus propiedades lo hace el favorito para estos usos. El acero AISI 4140 es considerado por autores como Bolívar et al (2013) y Peña et al (2009) como una aleación baja en Cromo-Molibdeno con una alta templabilidad y muy buena resistencia a la fatiga y al impacto, lo que le ha conferido en el mercado un buen puesto, dado que es utilizado para la construcción de herramientas especializadas para aviones, ejes de levas, tornillos de alta resistencia. Este acero es utilizado en piezas que requieren mayor dureza como asientos de válvulas y elementos de corte (Special Steels & Metals Limited 2012).

En este trabajo se evaluó el efecto del revenido a las temperaturas de 200°C, 300°C, 400°C, 500°C y 600°C en la microestructura y en las propiedades mecánicas del acero AISI 4140.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar el efecto de la temperatura de revenido en la microestructura y en las propiedades mecánicas del acero AISI 4140.

### **2.2 OBJETIVO ESPECIFICO**

- Caracterizar química y microestructuralmente al acero AISI 4140 antes y después de los tratamientos de temple y revenido a cinco diferentes temperaturas.
- Realizar ensayos de tensión al acero AISI 4140 templado y revenido a cinco diferentes temperaturas bajo norma ASTM E8.
- Relacionar la microestructura con las propiedades mecánicas del acero AISI 4140 templado y revenido a cinco diferentes temperaturas.
- Generar una base de datos de las propiedades mecánicas y de la microestructura del acero AISI 4140 templado y revenido a cinco diferentes temperaturas.



### **3. REVISIÓN DE LITERATURA**

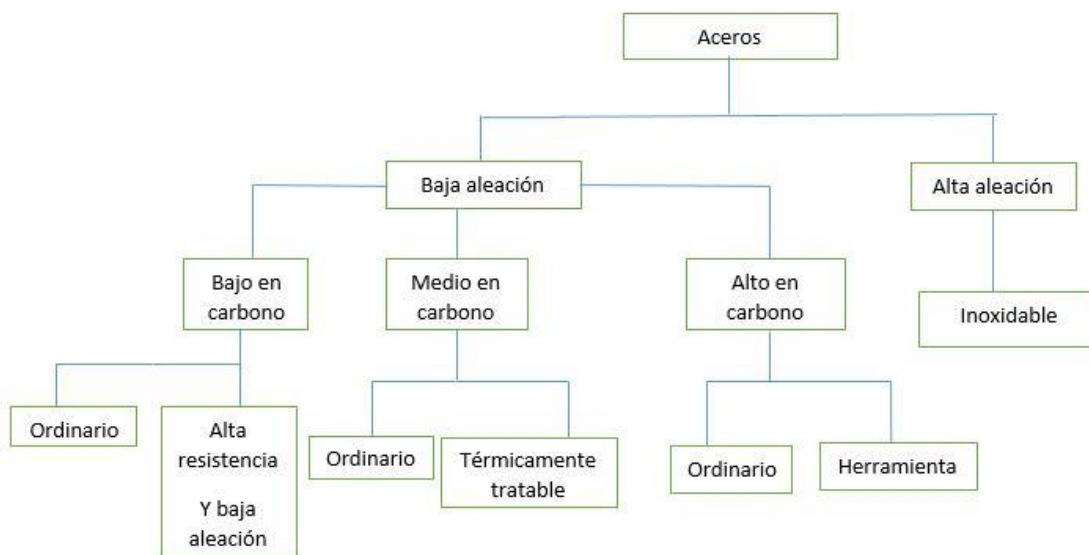
#### **3.1 ACEROS**

Los metales y sus aleaciones son conocidos como los materiales de mayor uso en la ingeniería. De manera general los metales se clasifican en ferrosos, aquellos que tienen como principal elemento al Hierro, y los no ferrosos que son aquellos que no tienen al hierro como principal elemento aleante SHACKELFORD J. (1995).

La base de las aleaciones ferrosas son las combinaciones de Hierro y Carbono que, según sus porcentajes, puede tomar el nombre de acero. El acero es una aleación de hierro con cantidades de carbono que oscilan entre 0,01 y 2,1 por ciento en peso. Este porcentaje de carbono es suficiente para mejorar propiedades mecánicas, como dureza, resistencia a la tensión, ductilidad, tenacidad, entre otros. Por las características de fabricación del acero, la necesidad de combinar los elementos residuales tales como S y P, y la necesidad de desoxidar el metal líquido, los aceros convencionales generalmente contienen elementos tales como Si, Mn, Al. Aunado a lo anterior, a los aceros se les puede adicionar algunos otros elementos de aleación para mejorar algunas de sus propiedades, otorgando una variedad de tipos de aceros y aleaciones base hierro.

El Hierro es un metal alotrópico, por lo que puede existir en más de una estructura cristalina dependiendo fundamentalmente de la temperatura y la presión. Es uno de los metales más útiles debido a su gran abundancia en la corteza terrestre, constituyendo más del 5 %, aunque rara vez se encuentra en estado puro, sino más bien combinado con otros elementos en forma de óxidos, carbonatos o sulfuros, se obtiene con cierta facilidad y con una pureza adecuada. (SIAS, 2013).

La composición de los aceros acorde a la composición o porcentaje de Carbono ha sido protagonista de muchos avances en la ingeniería de materiales. En este sentido, los aceros se pueden catalogar como aceros de baja aleación y alta aleación. Estos a su vez se subdividen de acuerdo al contenido de Carbono en bajo, medio y alto contenido de carbón como se muestra en la Figura 1. Los aceros ordinarios de esta clasificación no presentan elementos aleantes (CALLISTER, 2002).



**Figura 1.** Clasificación de los aceros de acuerdo al porcentaje de elementos aleantes y el contenido de carbono. **Fuente.** Callister (2002).

### **3.1.1. Aceros de bajo Carbono**

Según ASKELAND (1998) se caracterizan por ser de fácil accesibilidad, fácil mecanizado y muy económicos. Usualmente son utilizados en la industria automotriz, láminas de tubería, latas estañadas e incluso en la construcción de puentes. Estos aceros suelen tener un límite elástico de 275 MPa, un máximo de resistencia a la tracción de 550 MPa y una ductilidad del 25 %.

### **3.1.2. Aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA)**

El contenido químico de las aleaciones de estos aceros es básicamente cobre, vanadio, níquel y molibdeno en concentraciones combinadas de aproximadamente el 10 % en peso y poseen mucha mayor resistencia mecánica que los aceros bajos en Carbono, lo que permite a este acero ser más resistentes a la corrosión, en ciertas condiciones ambientales. Estos aceros se laminan en caliente para la obtención de granos muy finos con valores elevados del límite elástico y de resistencia mecánica, junto con una baja temperatura de transición dúctil-frágil. Cuando en los HSLA se baja el contenido de Carbono hasta un 0,10 % así como elementos aleantes, tienden a aumentar la soldabilidad y la formabilidad manteniendo constante su resistencia (CALLISTER, 2006)

### **3.1.3 Aceros de medio carbono**

Según JONES (2007) estos aceros tienden a ser más resistentes que los de bajo contenido de Carbono, sin embargo, son menos dúctiles y tenaces a razón de los tratamientos térmicos a los que son sometidos como temple y revenido. Estos aceros tienen porcentajes en Carbono comprendidos entre 0,25 y 0,6 %, de acuerdo a esto, resultan idóneos para la fabricación de ruedas y railes de trenes, engranajes, cigüeñales y muchos componentes más que necesitan alta resistencia mecánica, resistencia al desgaste y tenacidad.

#### **3.1.4 Acero de alto Carbono**

Generalmente contienen entre el 0,60 y 1,4 % en peso de C. Son más duros, resistentes y menos dúctiles que los otros aceros al Carbono. Casi siempre se utilizan con tratamientos de templado y revenido que lo hacen muy resistentes al desgaste y capaces de adquirir la forma de herramienta de corte. Generalmente contienen Cromo, Vanadio, Tungsteno y Molibdeno, los cuales dan carburos muy duros como  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{V}_4\text{C}_3$  y WC. Se utilizan como herramientas de corte, matrices para fabricar herramientas de herrería y carpintería. Por ejemplo, cuchillos, navajas, hojas de sierra, brocas para cemento, corta tubos, troqueles, herramientas de torno, muelles e hilos e alta resistencia (JONES, 2007).

#### **3.1.5 Aceros alta aleación**

Para CALLISTER (2006), los aceros ubicados en esta categoría tienen la particularidad de tener un contenido mayor del 5 % en peso de elementos aleantes. Dentro estos se encuentran los aceros para herramientas y los inoxidable. Particularmente en los primeros, los elementos aleantes son adicionados con el objetivo de generar mayor dureza para operaciones de mecánicas.

#### **3.1.6. Aceros de herramientas**

Los aceros de herramientas presentan resistencia y dureza máximas, y se emplean para cortar, mecanizar o dar forma a otro material. Hoy día resulta común la adición de gran cantidad de aleantes a este tipo de materiales, y las propiedades deseadas determinan la composición. Se requiere límite elástico elevado, por lo que la estructura óptima es la producida por bonificado con revenidos bajos. Para mejorar la tenacidad se añade silicio. A estos aceros son adicionados elementos fuertes formadores de carburos, como Tungsteno, Molibdeno, Cromo y Vanadio, estos elementos se dividen entre los carburos y la matriz austenítica durante la solidificación (CALLISTER, 2006).

### 3.2 NOMENCLATURA DE LOS ACEROS

Como la microestructura del acero determina la mayoría de sus propiedades y está gobernada por el tratamiento y la composición química, uno de los sistemas más generalizados para nombrar los aceros es por su composición química. Un sistema ampliamente utilizado es el de la *American Iron and Steel Institute* (AISI) y la *Society for Automotive Engineers* (SAE). Otra clasificación de amplio uso corresponde a la *American Society for Testing and Materials* (ASTM), que se basa más en la aplicación final de los aceros. Aunque cada país tiene sus propias normas oficiales, AISI y ASTM en los EEUU, Norma Oficial Mexicana (NOM) en México, *British Standard* (BS) en el Reino Unido, *Deutsches Institut für Normung* (DIN) en Alemania, *Japan Industrial Standard* (JIS) en Japón, *Association Francaise de Normalisation*, en Francia (AFNOR), existen un gran número de otras especificaciones según la rama industrial de aplicación. Por ejemplo, las normas *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) para aplicaciones mecánicas, *American Petroleum Institute* (API) petrolera, *American Railway engineering Association* (AREA) ferroviaria, *American Welding Society* (AWS) soldadura, *American Gears Manufacturing Association* (AGMA) engranes, *International Fasteners Institute* (IFI) tornillería, y así una amplia lista de normas. Actualmente existe una tendencia a normalizar todos los aceros bajo una sola norma internacional unificada o *Unified Numbering System* (UNS), o por medio de equivalencias entre las diferentes normas.

En Colombia, es ampliamente utilizada la clasificación AISI-SAE para aceros. En esta clasificación, los aceros se clasifican con cuatro o cinco dígitos precedidos de la palabra

AISI. Los primeros dos números se refieren a los principales elementos de aleación y los dos o tres últimos dígitos dan la cantidad de Carbono presente en el acero. Por ejemplo, un acero AISI 1040 es un acero con 0,4 % en peso de Carbono sin elementos aleantes y un acero AISI 4340 es un acero aleado que contiene 0,4 % en peso de carbono y el 43 indica la presencia de Cromo, Níquel y Molibdeno como elementos aleantes.

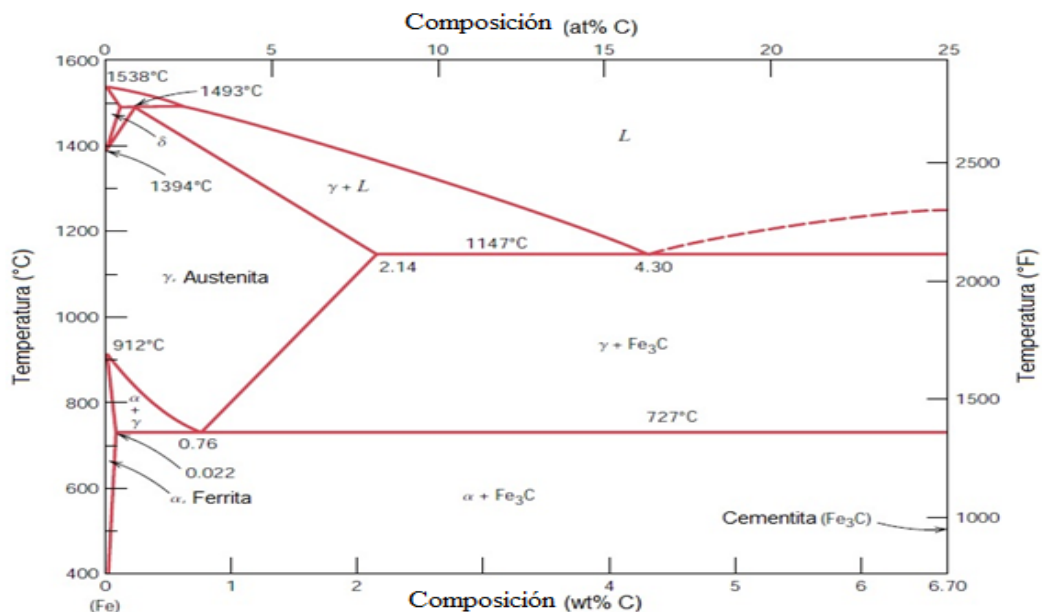
**Tabla 1.** Clasificación AISI-SAE de los aceros

Numero AISI-SAE	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Cr	Otros
1020	0.18-0.23	0,30-0.60				
1040	0.37-0.44	0.60-0.90				
1060	0.55-0.65	0.60-0.90				
1080	0.75-0.88	0.60-0.90				
1095	0.90-1.03	0.30-0.50				
1140	0.37-0.44	0.70-1.00				0.08-0.13%S
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.15-0.30		0.80-1.10	0.150.25%Mo
4340	0.38-0.43	0.60-0.80	0.15-0.30	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.30%Mo
4620	0.17-0.22	0.45-0.65	0.15-0.30	1.65-2.00		0.20-0.30%Mo
52100	0.98-1.10	0.25-0.45	0.15-0.30		1.30-1.60	
8620	0.18-0.23	0.70-0.90	0.15-0.30	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25%V
9260	0.56-0.64	0.75-1.00	1.80-2.20			

**Fuente:** (Callister, 2002).

### 3.3 MICROESTRUCTURA DEL ACERO

Se puede ver en el diagrama de Hierro- Carbono mostrado en la Figura 2, que en función de la temperatura y la composición existen tres formas alotrópicas del Hierro conocidas como Ferrita ( $\alpha$ ), Austenita ( $\gamma$ ) y Ferrita Delta ( $\delta$ ). Los límites específicos que definen las regiones de estas formas alotrópicas varían en función del contenido de Carbono y de la temperatura, y cada región presenta diferentes capacidades de disolver Carbono. La Ferrita presenta una estructura cristalina cubica de cuerpo centrado (CCC) que tiene limitada capacidad de disolver el carbono en su estructura. La Austenita tiene estructura cristalina de caras centradas (FCC) con alta capacidad de disolver carbono, en función del contenido de Carbono, la Ferrita pasa a Austenita en temperaturas  $\leq 910^\circ\text{C}$  y de Austenita a Ferrita del ataque tiene estructura cristalina CCC en temperaturas  $\geq 1400^\circ\text{C}$  DILLON (1995).



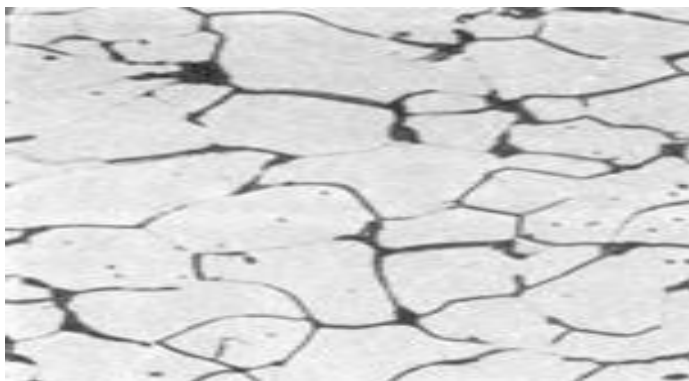
**Figura 2.** Diagrama hierro-carbono

**Fuente:** (Callister, 2006)

En este punto es conveniente considerar las principales estructuras metalográficas que se encuentran presentes en los aceros, ya sea por enfriamiento lento en condiciones de equilibrio o por tratamiento térmico en condiciones fuera de equilibrio (KRAUSS 2000; CALLISTER, 2006; REED-HILL, 1982).

### 3.3.1 Ferrita

Si se examina el diagrama hierro-carbono se verá que la estructura de la ferrita consiste prácticamente de Hierro puro, la cual, a temperatura ambiente, es una solución sólida de tipo intersticial de Carbono en hierro  $\alpha$ , con una solubilidad límite de aproximadamente 0,008 % de Carbono. Disuelve como máximo 0,025 % de Carbono a la temperatura eutectoide de 727 °C. Este constituyente puede contener, además de una pequeña cantidad de Carbono en solución sólida, otros elementos ya sea como residuales del proceso de fabricación o añadidos intencionalmente como elementos de aleación. Por esta razón el término ferrita se utiliza para incluir cualquier solución sólida basada sobre el hierro  $\alpha$ , para distinguirlas de aquellas soluciones sólidas de Hierro delta o Austenita (BHADESHIA, HONEYCOMBE, 2006; TOTTEN, 2006).



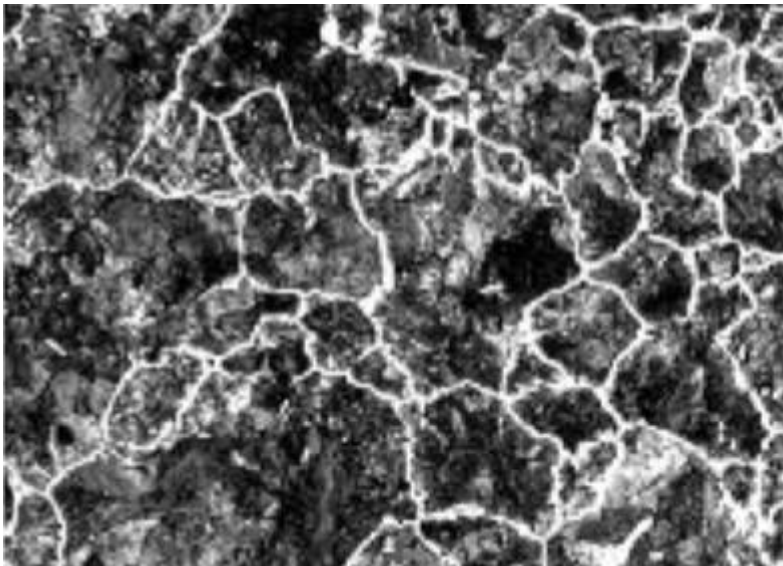
**Figura 3.** Micrografía de la Ferrita.

**Fuente:** Análisis Metalográfico y Termoquímico de Aceros, Robledo (1997).



### 3.3.2 Cementita

La Cementita, es un compuesto de Hierro y Carbono duro y frágil, conteniendo 6,69 % de Carbono correspondiendo esto a la composición en porcentaje en peso de  $\text{Fe}_3\text{C}$ , 3 átomos de Fe y uno de C. En los aceros al Carbono hipereutectoides y eutectoides la Cementita se encuentra formando parte de los granos de Perlita, mientras que en los aceros hipoeutectoides se encuentra en dos formas, como una red continua en los límites de grano con el interior formado por Perlita. En cada caso la Cementita está presente como un compuesto duro y resistente a la abrasión y como tal ejerce profunda influencia sobre el desempeño de los aceros. En los aceros aleados complejos, la Cementita juega un papel muy importante, no sólo por ella misma, sino en combinación con otros carburos formados con los elementos de aleación, para producir partículas extremadamente duras y resistentes a la abrasión (KRAUSS, 2000).



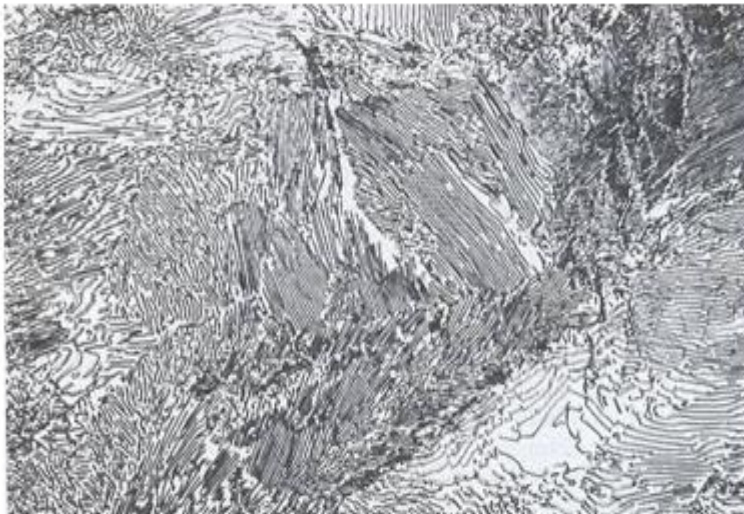
**Figura 4.** Cementita en forma de red clara en los bordes de los granos.

**Fuente:** Análisis Metalográfico y Termoquímico de Aceros y Fundiciones, Robledo (1997).

### 3.3.3 Perlita

Para BHADSHIA (2006); HONEYCOMBE (2006) es el producto de la reacción eutectoide. La estructura perlítica consiste de laminillas delgadas alternas de Cementita y Ferrita, denominándose este tipo de estructura como Perlita laminar.

En aceros al Carbono se presenta una estructura totalmente perlítica únicamente cuando la composición es la del punto eutectoide. En los aceros hipereutectoides la estructura consiste de granos de Perlita rodeada de granos de Ferrita. En los aceros hipereutectoides un enfriamiento desde la zona austenítica, provoca la formación de una cierta cantidad de Cementita proeutectoide, antes que la Perlita aparezca, quedando la parte formada por los límites de grano como una red continua de Cementita, mientras que el interior de los granos se transformará completamente en Perlita, cuando continúa el enfriamiento por debajo de los 727 °C.

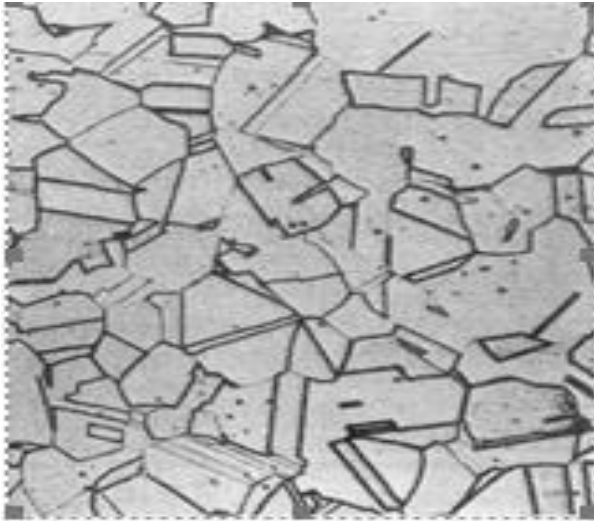


**Figura 5.** Micrografía de la Perlita.

**Fuente:** Kraus, 2000.

### 3.3.4 Austenita

Según TOTTEN (2006); KRAUSS (2000) es una solución sólida de Carbono en Hierro gama. Esta fase se extiende sobre una gran sección del diagrama Hierro Carbono, con la solubilidad del Carbono aumentando con la temperatura a un máximo de 2,11% a 1148°C. Del mismo diagrama se puede observar que la Austenita no existe a temperatura ambiente, para aceros al Carbono, bajo condiciones de equilibrio. En ciertos aceros aleados, como en el caso de los aceros para herramientas, una pequeña porción de Austenita puede retenerse en la estructura final, o en los aceros inoxidable austeníticos.



**Figura 6.** Micrografía de la Austenita.

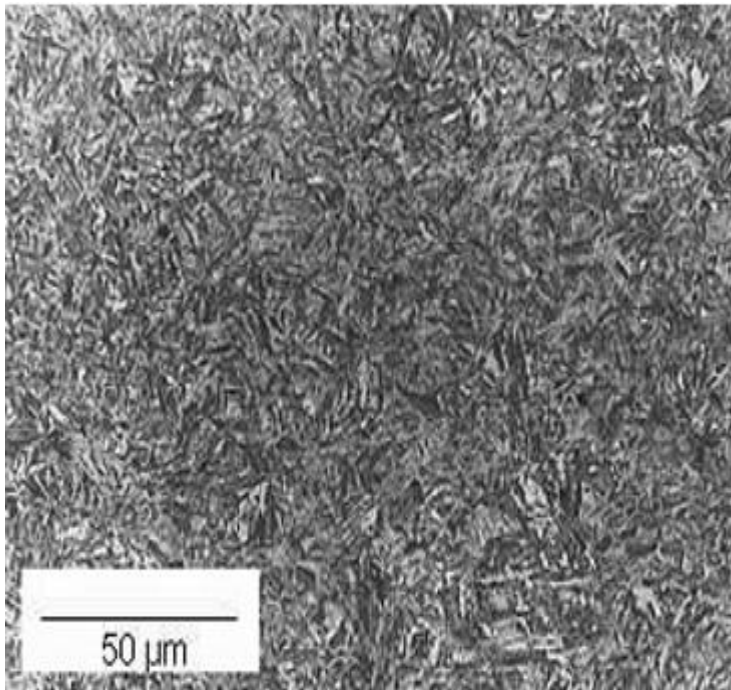
**Fuente:** Análisis Metalográfico y Termoquímico de Aceros y Fundiciones, Robledo (1997).

### 3.3.5 Bainita

La Bainita se puede describir como una mezcla de carburo de Hierro y Ferrita, y está formado por la nucleación y crecimiento en función de la difusión atómica BHADESHIA; HONEYCOMBE (2006). De esta forma la temperatura de formación de la Bainita influye en su morfología. La Bainita formada a temperaturas más altas se llama Bainita superior

y la que se forma a temperaturas más bajas se denomina Bainita inferior o Bainita acicular. Presenta una morfología (pequeños carburos de hierro distribuidos de manera uniforme en una matriz de Ferrita) muy diferente y más refinada que las láminas de Ferrita y Cementita que constituyen la Perlita, lo que da el acero mayor dureza. Este componente le da un aspecto acicular, tanto en alta y baja temperatura de procesamiento (TEICHERT, 1962). La Bainita inferior se caracteriza por una excelente ductilidad y resistencia al impacto con alta dureza, en algunos casos superior a la martensita templada (CHIAVERINI 2008).

Debido a que las laminillas de carburo y Ferrita son cada vez más finas, la dureza de la Bainita es mayor que la de la Perlita, aumentando entre más fina sea la Bainita.



**Figura 7.** Micrografía de Bainita que contiene agujas muy finas de Cementita.

**Fuente:**(Krauss, 2000).

### **3.3.6. Martensita**

La Martensita es indudablemente el constituyente metalográfico más importante en los aceros. Es un constituyente metaestable obtenido a partir de la transformación de la Austenita, para velocidades de enfriamiento por encima de la crítica, es el más duro de los componentes de transformación de la Austenita. La Martensita después del temple es frágil y baja ductilidad y por lo cual es necesario un subsecuente tratamiento térmico llamado revenido para optimizar sus propiedades mecánicas. La Martensita es una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro alfa. Se obtiene por enfriamiento muy rápido de los aceros, una vez elevada su temperatura lo suficiente para conseguir su constitución austenítica (TOTTEN 2006).

Se presenta en forma de agujas y cristaliza en la red tetragonal en lugar de cristalizar en la red cúbica centrada, que es la del hierro alfa, debido a la deformación que produce en su red cristalina la inserción de los átomos de carbono. Su dureza puede atribuirse precisamente a la tensión que produce en sus cristales esta deformación de la misma manera que los metales deformados en frío deben a los granos deformados y en tensión el aumento de dureza que experimentan. La proporción de carbono de la martensita no es constante, sin embargo, con el aumento en el contenido de Carbono aumenta dureza, resistencia mecánica y fragilidad en los aceros (KRAUSS 2000).

Cristalográficamente la martensita es una estructura tetragonal con átomos de C en posición intersticial deformada. La dureza de la Martensita es debida fundamentalmente al Carbono, no a los elementos de aleación. La transformación de Austenita en Martensita va siempre acompañada de aumento de volumen. La velocidad de transformación de la Austenita en Martensita es prácticamente instantánea.

### **Revenido de la Martensita**

Las transformaciones que se desarrollan al calentar una Martensita comprenden varias etapas, que a veces se solapan entre sí:

En la primera etapa (100° - 200° C), la Martensita de estructura tetragonal rechaza el Carbono en exceso y da origen a la precipitación de un carburo denominado épsilon, de estructura hexagonal compacta y fórmula aproximada  $M_{2,4}C$  (Donde “M” puede ser Fe o Cr). Por migración del Carbono se reduce progresivamente la tetragonalidad de la Martensita y cuando el Carbono llega a ser 0,20%, la Martensita ha cambiado de estructura pasando de tetragonal a cúbica centrada en el cuerpo, o Ferrita sobresaturada. Esta Martensita cúbica puede reconocerse por su rápido ennegrecimiento cuando es atacada con Nital.

La segunda etapa en el revenido (230-300° C) se caracteriza por la transformación de la Austenita residual en Bainita inferior. En esta etapa se produce dilatación; y a veces aumento de dureza cuando existe gran cantidad de Austenita residual. La transformación tiene lugar por nucleación y crecimiento. Podría formarse igualmente Bainita por transformación de la Austenita a temperaturas más elevadas.

La tercera etapa (300-350° C) se caracteriza por una notable pérdida de tenacidad. En este intervalo de temperaturas, tiene lugar una redisolución del carburo épsilon acompañado por precipitación de Cementita con forma de cilindro de unos 200 nm de longitud. La existencia de una red casi continua de este compuesto intermetálico confiere fragilidad a los revenidos bajos. El intervalo de temperaturas correspondiente, raramente es empleado para el revenido de los aceros templados.

Desde unos 400° C suele presentarse una cuarta etapa caracterizada por la esferoidización de las partículas de Cementita que, al globulizar, rompen la continuidad del retículo. A ello se añade la restauración y recrystalización de la Ferrita, con el consiguiente aumento de tenacidad.

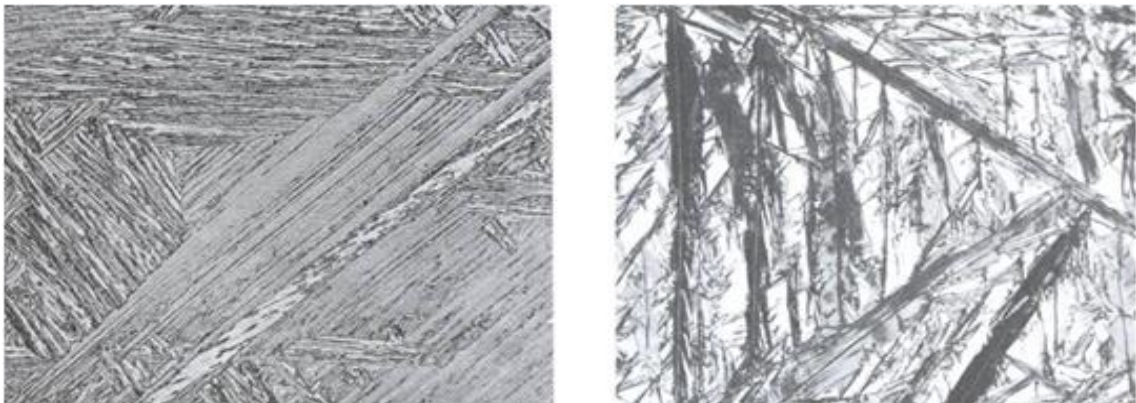
Una quinta etapa suele presentarse en algunos aceros aleados con Ni, Cr, Mn, e impurezas como Sb (800 ppm), Sn (500 ppm), P (500 ppm); se manifestó después extensamente en algunos cañones durante la primera guerra mundial; dando lugar, por ello, a la denominación de fragilidad Krupp, con que suele denominarse a esta fragilidad a los revenidos altos.

En algunos aceros, en cuya composición figuran elementos formadores de carburos como Mo, W, V, y Ti, suelen presentar a 600° C una sexta etapa de revenido denominada etapa de dureza secundaria. Si antes del temple estos elementos estaban disueltos en la Austenita, formando con ella solución sólida, pasan en el temple a formar solución sólida en la Martensita, y permanecen en solución sólida en la Ferrita durante el revenido, en tanto no se alcancen temperaturas del orden de 600°. Su precipitación va acompañada de aumento de dureza.

En cuanto a propiedades mecánicas, según se ha indicado con anterioridad, todos los aceros templados y revenidos presentan una etapa de globalización de la Cementita, que confiere al acero una estructura de precipitación fina y dispersa, no visible al microscopio óptico, y que proporciona plasticidad y buen comportamiento a la fatiga.

Al revenir la Martensita, su dureza disminuye a medida que se eleva la temperatura, y en parecido sentido aumenta la tenacidad. Los elementos de aleación que se hallan en disolución sólida dentro de la Martensita, estabilizan ésta al revenido y producen una

caída más lenta de su dureza, al elevar la temperatura. Con ello, en aceros aleados, se consigue en la zona útil de revenido, durezas y resistencias superiores a las obtenidas en aceros al Carbono de mayor porcentaje en Carbono. Con la ventaja de que esta Martensita aleada, tendrá mayor resiliencia (por tener menor contenido en Carbono) que la Martensita del acero al Carbono. Los aleantes estabilizan cuantitativamente en diversa medida la dureza y resistencia de la Martensita, por mecanismos no bien determinados. En cuanto a variaciones dimensionales durante el revenido, cabe señalar que el paso de Martensita a Martensita revenida supone contracción en alguna de las etapas, dilatación en otras, y contracción en las siguientes. En conjunto, la transformación de Martensita a Martensita revenida supone contracción de volumen. La Martensita observada al microscopio presenta un aspecto acicular con efectos de relieve producidos por mecanismos de cizallamiento, prueba de que su formación resulta de transformaciones casi instantáneas sin difusión en ciertos planos cristalográficos de la malla de Austenita (KRAUSS, 2000).



**Figura 8.** Micrografía de Bainita que contiene agujas muy finas de Cementita.

**Fuente:**( Krauss, 2000).



### 3.4 ACERO AISI 4140

#### 3.4.1 Características

Acero grado al Cromo-Molibdeno con buena resistencia a la tensión, torsión y a la flexión. Para piezas y partes de maquinaria de uso general. Normalmente no requiere un tratamiento térmico adicional. Conserva la dureza y resistencia a altas temperaturas gracias al Cromo y Manganeso. Son menos susceptibles al fragilizado, debido al revenido por el Cromo y Molibdeno. Poseen buenas características de endurecido profundo, ductilidad y capacidad para soldarse por el Manganeso y Molibdeno. Posee alta resistencia en pequeñas y medias medida para la construcción de máquinas, ver composición química en la tabla 2.

**Tabla 2.** Composición química del acero AISI 4140 porcentaje en peso

Composición química	C	Cr	Mo	Ni	Mn
% prom. En peso	0.38- 0.43	0.8-1.1	0.15-0.25	0.12	0.75-1
Elemento	Si	P	S	Cu	
% prom. En peso	0.15- 0.35	0.02	0.003	0.19	-----

**Fuente:** propiedades mecánicas y caracterización microestructural de diferentes aceros dual-fase ( SVOBODA, 2008).

### 3.4.2 Aplicaciones:

Recipientes sujetos a presión, partes estructurales de los aviones y ejes de los automóviles. Piezas de transmisión: ejes, cigüeñales, coronas dentadas, pernos, columnas de prensas, vástagos, partes de maquinarias y repuestos de dimensiones medianas con grandes exigencias en las propiedades mencionadas, varillas roscadas para la industria petrolera.

Ver valores de esfuerzo último y de dureza del acero AISI 4140 en función de la temperatura de revenido en la tabla 3.

**Tabla 3.** Valores de esfuerzo último y de dureza del acero AISI 4140 en función de la temperatura de revenido.

Temperatura [°C]	Esfuerzo Último [GPa]	Dureza[HRC]
200	1.93	56
300	1.79	53
400	1.59	48.5
500	1.23 – 1.33	38
600	0.97 – 1.33	30

**Fuente:** propiedades mecánicas y caracterización microestructural de diferentes aceros dual-fase (SVOBODA, 2008).

Los tratamientos térmicos son básicamente procesos que abarcan fundamentalmente 4 pasos: calentamiento, tiempo de permanencia en una o más temperaturas, enfriamiento y la velocidad a la cual se realizan los calentamientos o enfriamientos (CHIAVERINI, 2008).

CHIAVERINI (2008), plantea que dentro de los objetivos principales de los tratamientos térmicos se encuentra:

- 1) Obtener las propiedades físicas y mecánicas requeridas.
- 2) relevar las piezas de esfuerzos internos o residuales.
- 3) controlar la distorsión.
- 4) obtener una buena penetración de temple.
- 5) refinar el grano.
- 6) modificar la microestructura para mejorar la maquinabilidad.

La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no ferrosas, y ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecidos. A través de los tratamientos se modifica la constitución del acero, variando el estado en el que se encuentra el carbono, y el estado alotrópico del Hierro, se modifica la estructura, variando el tamaño de grano y el reparto de los constituyentes, el estado mecánico queda afectado por las tensiones a las cuales son sometidos los materiales luego de algunos TT, principalmente después de un temple, el producto sólido se expone parcial o totalmente a ciclos térmicos según lo amerite la ocasión, deben ser tomadas en cuenta

tanto la temperatura de enfriamiento como la de calentamiento y de igual forma los medios en lo que se efectúen los tratamientos como tales.

Otros factores que deben ser considerados son: la composición del material, la velocidad de calentamiento, duración del tratamiento. Casi todos los tratamientos se llevan a cabo en hornos especiales, que pueden ser de tipo continuo, con zonas a temperaturas diferentes por las que va pasando la pieza, o bien de tipo discontinuo. El enfriamiento puede tener lugar dentro o fuera del horno.

A continuación, se describen algunos de los tratamientos térmicos frecuentemente utilizados:

### **3.5 RECOCIDO**

Según SMITHF (1998) el Recocido en un acero puede ser empleado para obtener diferentes resultados incluyendo, reducción de la dureza para incrementar su formabilidad, maquinabilidad y las propiedades mecánicas requeridas y para relevar esfuerzos inducidos por el trabajo en caliente, enfriamiento o gradientes térmicos no homogéneos dentro de la pieza.

Existen diferentes tipos de Recocido que se pueden emplear en los aceros. Estos tratamientos dependen de las características o aplicaciones que se le quiera dar a la pieza. Algunos de los recocidos más comúnmente utilizados son los siguientes:

#### **3.5.1 Recocido completo**

Consiste en calentar el material por arriba de la temperatura crítica  $Ac_3$  y mantener esta temperatura un periodo de tiempo suficiente para que la temperatura en la pieza sea uniforme. Seguido de un enfriamiento lento por debajo de la temperatura crítica  $Ac_1$ . La temperatura de autenticación es relativamente alta para promover los carburos en solución. El enfriamiento lento controlado, generalmente llevado a cabo dentro del horno con descensos reducidos programados en la temperatura, asegura que la transformación de Austenita a perlita sea efectiva, dando como resultado la formación de perlita laminar gruesa que proveen a la pieza de baja dureza, alta maleabilidad, además de eliminar esfuerzos internos o residuales CALLISTER (2006).

### **3.5.2 Recocido intercrítico**

En este tratamiento térmico la Austenita se empieza a formar conforme la temperatura excede  $Ac_1$ . Con este tratamiento se promueve una mezcla de Austenita y ferrita, ya que la temperatura de tratamiento se sitúa entre  $Ac_1$  y  $Ac_3$ .

El grado de homogeneidad en la estructura a la temperatura de austenización es una importante consideración en el desarrollo de las estructuras y propiedades del recocido.

La Austenita formada en el acero tratado por arriba de la temperatura  $Ac_1$  se transforma de nuevo a Ferrita y carburos si el acero tiene un enfriamiento lento por debajo de  $Ac_1$ .

La velocidad de descomposición de la Austenita y la estructura de los carburos, para que estos sean laminares o esferoidales dependerá en mucho de la temperatura de transformación. La estructura resultante puede contener carburos esferoidales o Perlita laminar, dependiendo de la composición del acero y la temperatura de Austenizado.

La dureza en estos casos resulta ser baja. Si se desea tener la mayor suavidad, maleabilidad o ductilidad en el material, es necesario tener velocidades de enfriamiento muy bajas en el enfriamiento continuo o permanecer largo tiempo en los tratamientos isotérmicos.

### **3.5.3 Recocido subcrítico**

En este tipo de recocido no se forma Austenita. La condición previa de un acero es modificada por procesos como la recuperación, recristalización, crecimiento de grano y la aglomeración de carburos. Por lo tanto, en este tratamiento la historia termo-mecánica del acero es de suma importancia. Los aceros en los procesos de forjado o rolado contienen ferrita y perlita; por lo tanto, la dureza de ambos constituyentes se puede ajustar. Si el objetivo es el ablandamiento máximo, los tiempos a la temperatura elegida deben de ser excesivamente largos. La velocidad de ablandamiento aumenta rápidamente a medida

que la temperatura se aproxime a  $A_{c1}$ . La práctica de enfriamiento en el Recocido subcrítico tiene un efecto limitado en la microestructura y propiedades resultantes ya que éstas se encuentran ya establecidas (KRAUSS, 2000).

### **3.6 NORMALIZADO**

Según KRAUSS (2000); CALLISTER (2006); CHIAVERINI (2008) el Normalizado es un tratamiento en donde el acero es calentado a una temperatura por encima de su temperatura crítica  $A_{c3}$  y enfriado en aire calmado hasta una temperatura por debajo del rango de transformación. En la práctica generalmente se normaliza entre 55 y 65°C arriba de la temperatura crítica. En algunos aceros aleados donde los carburos son difíciles de disolver es recomendable calentar a una temperatura más alta para asegurar la disolución de los carburos. Un adecuado proceso de normalizado requiere: que la pieza sea calentada uniformemente a una temperatura suficiente para alcanzar la transformación completa de Ferrita y Cementita a Austenita.

El tiempo de permanencia a la temperatura adecuada debe ser suficientemente largo como para que la pieza tratada alcance la uniformidad que necesita. El enfriamiento debe ser en aire quieto de manera uniforme. El Normalizado en los aceros forjados se utiliza como acondicionamiento del tratamiento final y para refinar la estructura. En ocasiones el enfriamiento puede ser en aire forzado a fin de acelerar la transformación y obtener Perlitas finas, Bainitas o inclusive Martensita, ya sea completa o una mezcla de las anteriores fases. Todo esto le da al acero un endurecimiento parcial. Un normalizado puede ablandar, endurecer o revelar esfuerzos en un acero, dependiendo de la composición del acero, dimensiones de la pieza y la condición del acero después del proceso de forja.

Los objetivos del normalizado son:

- 1) Refinar el grano y homogenizar la microestructura para mejorar la respuesta del acero en una operación de endurecimiento por temple.
- 2) Mejorar las características de maquinabilidad del acero.
- 3) Modificar y refinar las estructuras dendríticas de la colada.
- 4) Ayudar a alcanzar las propiedades mecánicas deseadas.

Durante el proceso de forjado, algunas secciones de la pieza pueden estar sujetas a diferentes niveles de trabajo o deformación plástica, las temperaturas finales pueden variar de una pieza a otra y dentro de la misma, debido a la diferencia en velocidades de enfriamiento desde la temperatura de forja hasta la temperatura ambiente, ocasionando una variedad de tamaños de grano y microestructuras. Así el Normalizado refina la microestructura y tamaños de grano resultantes, produciendo uniformidad y una microestructura con un tamaño de grano relativamente fino (VALENCIA, 1992).



### **3.7 AUSTENIZADO**

El material debe ser calentado por arriba de temperatura crítica Ac3, la cual es la mínima temperatura a la que el acero es calentado para formar 100% de Austenita. La temperatura crítica Ac1 es una temperatura a la cual se inicia la transformación de Austenita y entre Ac1 y Ac3 se puede tener una mezcla de Ferrita y Austenita o la Cementita y Austenita, dependiendo del % de C del acero. En los aceros aleados la temperatura de austenización puede ser lo suficientemente alta para disolver los carburos en solución o para tomar el mayor provecho del efecto de los elementos aleantes y obtener la mejor templabilidad, pero no debe ser tan alta que provoque crecimiento excesivo de los granos de Austenita. En las piezas forjas, el tiempo de permanencia tiene una influencia similar que la temperatura utilizada para austenización. Debido a que los cambios microestructurales a la máxima temperatura ocurren con mucha rapidez, el factor tiempo es de igual importancia que la temperatura. Además, la decarburización y distorsión se incrementan con el tiempo de permanencia. Para evitar estos efectos, el tiempo de permanencia a alta temperatura debe ser cuidadosamente controlado y debe tratar de ser lo más corto posible, cuidando de la uniformidad de calentamiento en todas las secciones de la pieza, mediante el uso de curvas o rampas de calentamiento previamente diseñadas y operando los hornos con sistemas robustos de control de temperatura (MACHADO, 2002).

### **3.8 TEMPLE**

Se refiere al proceso de enfriamiento rápido de aceros desde la temperatura de austenización, su finalidad es aumentar la dureza y la resistencia mecánica del acero. Las propiedades óptimas de un acero templado y revenido se consiguen solo si durante el tratamiento térmico de temple la muestra adquiere la microestructura requerida, dureza, resistencia o tenacidad, minimizando esfuerzos residuales, distorsión y posibilidad de fractura. La dureza obtenida

está en función principalmente del contenido de carbono y el porcentaje de martensita producida. La selección del medio de temple depende de la templabilidad de la aleación en particular, el espesor y forma de la pieza involucrada y los intervalos de enfriamiento requeridos para alcanzar la microestructura deseada. Los medios de enfriamiento comúnmente usados son: aceite, agua y agua con sales. El concepto de templabilidad significa la habilidad del acero para desarrollar martensita a diferentes profundidades en la sección transversal de la aleación que se procesa. Esto está en función del contenido de elementos aleantes y el medio de enfriamiento empleado. La efectividad de un temple depende también de un buen diseño del sistema de temple (enfriamiento) y su mantenimiento CALLISTER (2006); CHIAVERINI (2008). Del tipo de medio de temple, el grado de agitación de la tina, considerando además el tamaño, configuración, acabado y composición el acero utilizado en la pieza forjada, así como su templabilidad.

Las soluciones de polímero son una alternativa al agua o aceite. Generalmente pueden ofrecer factores de templabilidad similares a los del agua sin la indeseable capa de vapor que se forma con el empleo de esta. Sin embargo, las soluciones poliméricas son empleadas generalmente en sustitución del aceite (MACHADO, 2002).

### **3.8.1 Temple superficial**

Se recurre a un proceso de temple superficial cuando se desea que una pieza presente elevada dureza superficial y buena resistencia exterior al desgaste, pero que su alma siga manteniéndose con reducidas tensiones. Con el temple superficial se consigue que solamente la zona más exterior se transforme en Martensita, y para ello el tiempo durante el que se mantiene el calentamiento debe ser el adecuado para que solamente un reducido espesor de acero se transforme en austenita VALENCIA, (1992).

### **3.8.2 Martempering**

Consiste en calentar el acero a temperatura de austenización y mantenerlo el tiempo necesario para que se transforme completamente en Austenita. Posteriormente se enfría en un baño de sales bruscamente hasta una temperatura próxima, pero superior, a  $M_s$ , con el fin de homogeneizar la temperatura en toda la masa y se acaba reduciendo la temperatura para que toda la pieza se transforme en Martensita VALENCIA, (1992).

### **3.8.3 Austempering**

Consistente en calentar el acero a temperatura de austenización y mantenerlo el tiempo necesario para obtener Austenita. Posteriormente se enfría bruscamente en un baño de sales hasta una temperatura determinada, para igualar la temperatura en toda la masa y luego se vuelve a disminuir la temperatura para que toda la pieza se transforme en Bainita VALENCIA, (1992).

### **3.8.4 Patenting**

Este tratamiento consiste en introducir el acero austenizado en un baño de Plomo fundido mantenido entre 510 y 540°C. El tiempo de permanencia en el baño será el necesario para que la estructura del acero se transforme por completo en Perlita fina. El Patenting es un tratamiento muy utilizado en la fabricación de alambre, ya que la estructura de la Perlita fina, a causa de su elevada ductilidad, resulta ideal para el trefilado VALENCIA, (1992).

### **3.8.5 Templabilidad**

Se entiende por templabilidad la profundidad a la que penetra en la pieza la zona templada. La templabilidad incompleta se explica porque durante el temple, la pieza se enfriará más rápido en la superficie que en el centro. Es evidente que en la medida que disminuye la

velocidad crítica de temple aumenta la profundidad de la capa templada, y si la  $V_c$  es menor que la velocidad de enfriamiento en el centro de la pieza, esta sección se templará completamente. Por consiguiente, cuanto menor sea  $V_c$ , tanto mayor será la templabilidad. Para valorar prácticamente la templabilidad se utilizará una magnitud llamada diámetro crítico ( $D_c$ ). El diámetro crítico es el diámetro máximo para una barra cilíndrica que se temple en toda su sección en un medio de enfriamiento dado. Por consiguiente, para un acero dado a cada medio de enfriamiento le corresponde un diámetro crítico. Si es necesario que una pieza se temple en todo su espesor hay que elegir un acero tal que:

$$D_c > D_{\text{pieza}}.$$

Una pieza templada se halla siempre en un estado de tensión estructural. El Revenido es un medio necesario y radical para disminuir las tensiones residuales. El calentamiento del acero en el revenido aumenta la plasticidad, esto permite que, en los diversos volúmenes, las deformaciones elásticas se conviertan en plásticas, con lo cual disminuye la tensión (SMITHF, 1998; CALLISTER, 2006).

### **3.9 REVENIDO**

Es un proceso en el cual previamente endurecido el acero por Temple, es calentado por debajo de la temperatura crítica y enfriado en un intervalo deseado, principalmente para incrementar la ductilidad, tenacidad, eliminar las tensiones creadas en el temple y mejorar la estabilidad dimensional, dejando al acero con la dureza o resistencia deseada. Las variables asociadas con el Revenido que afectan la microestructura y propiedades mecánicas son: temperatura de revenido, tiempo de permanencia, intervalo de enfriamiento y composición química del acero CALLISTER (2006).

La combinación óptima de propiedades mecánicas es lograda cuando la microestructura del acero es Martensita revenida. Además, en aplicaciones en donde la resistencia al desgaste del componente es de suma importancia, puede ser necesario que la pieza requiera de la máxima dureza posible. Entonces la estructura deseada tendrá que ser Martensita con un ligero Revenido, suficiente para remover los esfuerzos internos producidos por el temple, dejando la dureza más alta posible.

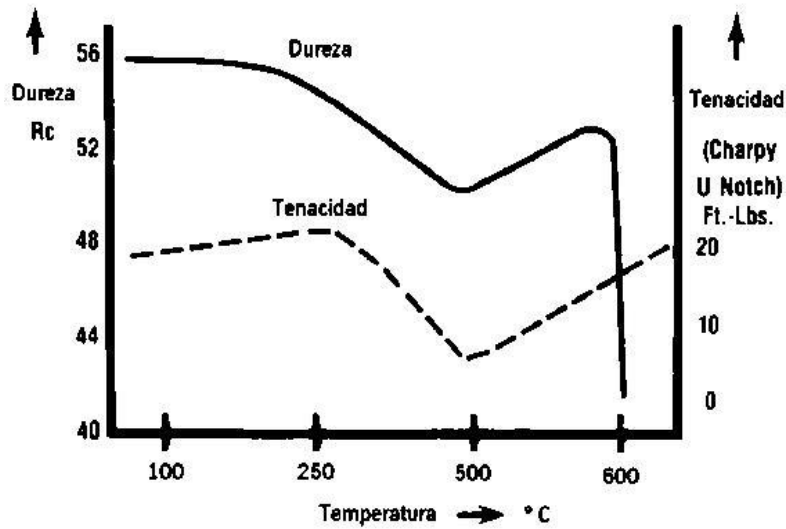
La dureza es probablemente la propiedad más común reportada para aceros templados y revenidos, puede ser considerada como una medida de la habilidad del acero para soportar cargas en servicio sin sufrir cambios permanentes de forma o deformación plástica. SMITHF, (1998). Las figuras 8 muestran la variación de la tenacidad y dureza en función de la temperatura de revenido para un acero al carbono de baja aleación.

### **3.9.1 Doble revenido**

Los aceros que forman Bainita en el Revenido o tienen Bainita en su estructura después del endurecimiento, tales como algunos aceros aleados en secciones gruesas, solo necesitan un Revenido, lo mismo que los aceros de bajo Carbono en los cuales hay poca Austenita retenida después del temple.

Sin embargo, a los aceros rápidos y a los aceros indeformables de alto Cromo es necesario darles después del temple un doble revenido.

Cuando estos aceros se templean pueden contener entre el 5% y 25% de Austenita retenida. Al revenirlos esta austenita retenida se transforma en Martensita cuando se enfría desde la temperatura de revenido (500-550°C). Esta Martensita tiene tensiones internas y puede inducir grietas. Por eso estos aceros se deben revenir de nuevo para mejorar la tenacidad de esta Martensita formada recientemente. Si en el primer revenido se obtuvo la dureza deseada el segundo debe hacerse a una temperatura menor para evitar que disminuya. Generalmente, el segundo revenido debe efectuarse a una temperatura que sea de 10°C a 30°C menor que la del primer revenido.

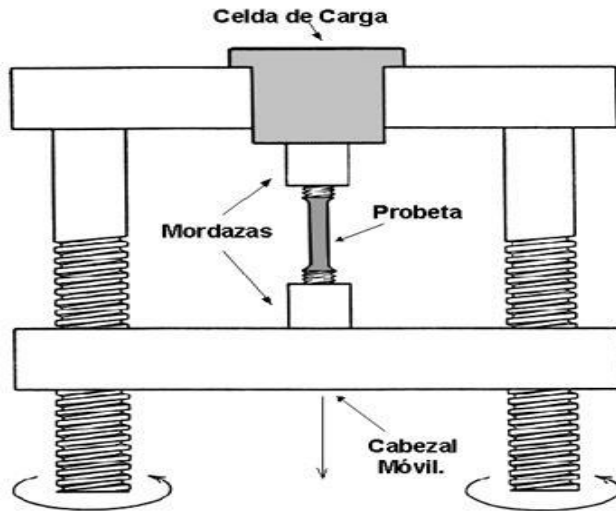


**Figura 9.** Tenacidad en función de la temperatura de revenido para un acero al carbono de baja aleación.

**Fuente:** (SMITHF, 1998)

### 3.10 ENSAYO DE TENSIÓN

EL ensayo consiste en someter el material a cargas o esfuerzos los cuales se van incrementando a velocidades constantes, en donde se genera deformaciones elásticas y/o plásticas como respuesta según el nivel de la carga. Este ensayo suministra información sobre la resistencia y ductilidad del acero bajo esfuerzos de tensión uniaxial. De este se pueden obtener propiedades mecánicas de gran importancia: Límite de Fluencia, Resistencia máxima a la Tensión, ductilidad, entre otras. La figura 10, muestra esquemáticamente un ensayo de tensión.



**Figura 10.** Representación esquemática de un ensayo de tensión.

**Fuente:** Askeland, 2005.

Después de realizar un ensayo de tensión se puede obtener las siguientes propiedades:

- **Esfuerzo de cedencia o límite elástico.**

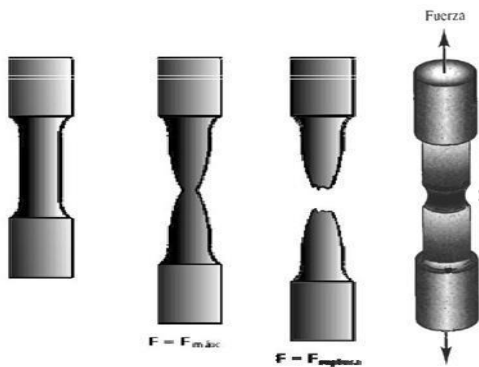
Es el esfuerzo al cual la deformación plástica se hace importante, en los metales, es por lo general el esfuerzo requerido para que las dislocaciones se deslicen. El esfuerzo de cedencia es por lo tanto el esfuerzo que divide los comportamientos elástico y plástico del material. En algunos casos el esfuerzo al cual el material cambia su comportamiento de elástico a plástico no se detecta fácilmente. En este caso, se determina un esfuerzo de cedencia convencional de 0,2% es el esfuerzo al cual dicha línea interseca la curva esfuerzo –deformación.



- **Resistencia a la tensión**

El esfuerzo obtenido de la fuerza más alta aplicada es la resistencia a la tensión, que es el esfuerzo máximo sobre la curva esfuerzo-deformación ingenieril. En muchos materiales dúctiles, la deformación no se mantiene uniforme, en cierto momento, una región se deforma más que otra y ocurre una reducción local de importancia en la sección recta esta región localmente deformada se le conoce como zona de estricción

Dado que el área de la sección transversal en este punto se hace más pequeña, se requiere una fuerza menor para continuar su deformación y se reduce el esfuerzo ingenieril, calculado a partir del área original  $A_0$  (la resistencia a la tensión es el esfuerzo al cual se inicia el encuellamiento o estricción en materiales dúctiles)



**Figura 11.** Encuellamiento. **Fuente:** (Askeland, 1998)

- **Módulo de elasticidad o módulo de Young E**

Es la pendiente de la curva esfuerzo deformación en su región elástica. Esta es la ley de Hooke. Este módulo está íntimamente relacionado con la energía de enlace de átomos, una pendiente muy acentuada o abrupta en la gráfica fuerza –deformación unitaria, en la zona de equilibrio indica que se requieren de grandes fuerzas para separar los átomos y hacer que el material se

deforme elásticamente. Por tanto, si el material tiene un módulo de elasticidad alto, las fuerzas de enlace y el módulo de elasticidad por lo general son mayores en materiales de punto de fusión alto. El modulo es la medida de la rigidez del material Askeland, (2005).

- **Resiliencia**

Es el área que aparece bajo la porción elástica de la curva esfuerzo-deformación, es la energía elástica que un material absorbe o libera durante la aplicación y liberación de carga aplicada respectivamente. En este caso un comportamiento elástico lineal.

- **Ductilidad**

La ductilidad mide el grado de deformación que puede soportar un material sin romperse, se puede medir la distancia entre las marcas calibradas en una probeta antes y después del ensayo. El % de elongación representa la distancia que la probeta se alarga plásticamente antes de la fractura.

Un segundo método para medir la ductilidad es calcular el cambio porcentual en el área de la sección transversal en el punto de fractura antes y después del ensayo el % de reducción de área expresa el adelgazamiento sufrido por el material durante la prueba (ASKELAND, 1998).

### **Tenacidad**

Área bajo la totalidad de la curva esfuerzo-deformación unitaria. Se define como la capacidad que tiene un material para absorber energía antes de fracturarse.

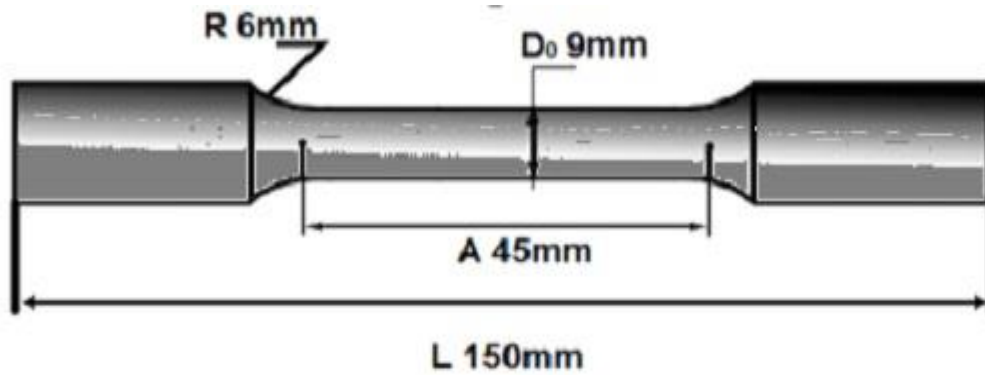
## **4 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1 MATERIALES**

Se utilizó como material de estudio el acero AISI 4140 en forma de barra circular con diámetro de 12,5 mm suministrado por la empresa Comercial TIR de montería. La composición química del acero fue verificada por espectroscopia de emisión óptica en el laboratorio de materiales de la Universidad de Antioquia.

### **4.2 TRATAMIENTO TÉRMICO**

Antes de los tratamientos térmicos, las probetas fueron maquinadas acorde a las dimensiones del espécimen 2 para ensayos de tensión establecidas en la norma ASTM E8 (2000) que se muestran en la Figura 12. Los tratamientos térmicos se realizaron en un horno tipo mufla marca TERRIGENO MODELO D8 con tasa de calentamientos de 60 °C/min y controlador de temperatura digital perteneciente al laboratorio de materiales y procesos del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba. En todos los tratamientos, el acero fue introducido después de que el horno alcanzó la temperatura estipulada para cada tratamiento. El tiempo de sostenimiento se tomó una vez se estabilizó la temperatura del horno. Este tiempo de estabilización siempre fue inferior a 5 minutos, MACHADO, (2002).



**Figura 12.** Especímenes Estándares para probetas redondas. Norma ASTM E8.

**Fuente:** autores

En el tratamiento de temple, las probetas de acero fueron austenizadas a 850°C por una hora y enfriadas en aceite. Posteriormente se realizaron revenidos a 5 temperaturas diferentes y se enfriaron al aire. Las temperaturas de revenido fueron 200°C, 300°C, 400°C, 500°C y 600°C, MACHADO, (2002).

#### 4.3 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

Se utilizaron probetas de 12 mm de diámetro y 10 mm de longitud que fueron sometidas a un proceso de desbaste con papeles de lija ASTM número 100, 280, 360, 600, 1000 y 2000. Posteriormente, se pulieron en paños impregnados con alúmina de 12 y 1  $\mu\text{m}$  usando la pulidora metalográfica Dace Technologies Nano 1000. Se utilizó el ataque químico Nital para revelar la microestructura del acero con base en la norma ASTM E4 (2007). Estos procesos fueron realizados en el laboratorio de materiales y procesos del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba.

La microestructura del acero antes y después de los tratamientos térmicos fue evaluada utilizando un microscopio óptico de luz reflejada (MO) marca OLYMPUS GX41 dotado

con cámara digital OMAX de 9.0 Megapíxeles y software de adquisición de imágenes TopView V 3.7.

Adicionalmente a la evaluación microestructural, se realizaron medidas de dureza en escala Rockwell C bajo norma ASTM E 18 (2003) en durómetro localizado en el taller industrial REMEC. Los datos reportados son el promedio de 3 mediciones.

#### **4.4 ENSAYOS DE TENSION**

Los ensayos de tensión se realizaron bajo norma ASTM E8M (2000) empleando una máquina universal de ensayos marca MTS C45305 con capacidad máxima de 300 KN, localizada en el laboratorio de materiales y procesos del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba. Se ensayaron tres probetas por cada temperatura de revenido y tres en la condición de estado de entrega. Los ensayos se realizaron utilizando un extensómetro con resolución de 0,001 mm, velocidad de desplazamiento de las mordazas de 0,03 mm/s y una precarga de 0,03 KN. Iniciado el ensayo con los valores establecidos, la maquina se detiene luego de presentar la ruptura de la probeta o al censar una fluctuación del 30 % del valor de la carga máxima. Los datos fueron registrados en el software TW Elite de la máquina, tomando 50 datos por segundo, permitiendo la elaboración de la gráfica esfuerzo – deformación unitaria y así calcular las siguientes propiedades: Esfuerzo a tensión, esfuerzo de fluencia, módulo de Young, ductilidad, tenacidad y resiliencia, empleando las ecuaciones mencionadas anteriormente o directamente en la gráfica obtenida, identificando las zonas elásticas y plásticas en dicha grafica para cada aleación.

## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización química

Los resultados de composición química del acero AISI 4140 medidos por espectroscopia de emisión óptica junto con los valores nominales estipulados en la norma se presentan en la Tabla 4. Cada valor corresponde al promedio de tres mediciones.

**Tabla 4.** Composición química nominal y medida por espectroscopia de emisión óptica en el acero AISI 4140, porcentajes en peso.

<b>Composición química %</b>	<b>C</b> %	<b>Cr</b> %	<b>Mo</b> %	<b>Ni</b> %	<b>Mn</b> %	<b>Si</b> %	<b>P</b> %	<b>S</b> %	<b>Cu</b> %
<b>Nominal</b>	0.38- 0.43	0.8- 1.1	0.15- 0.25	0.12	0.750- 1	0.15- 0.35	0.02	0.003	0.19
<b>Medido</b>	0.404	0.919	0.171	0.171	0.846	0.222	0.014	0.026	0.0038

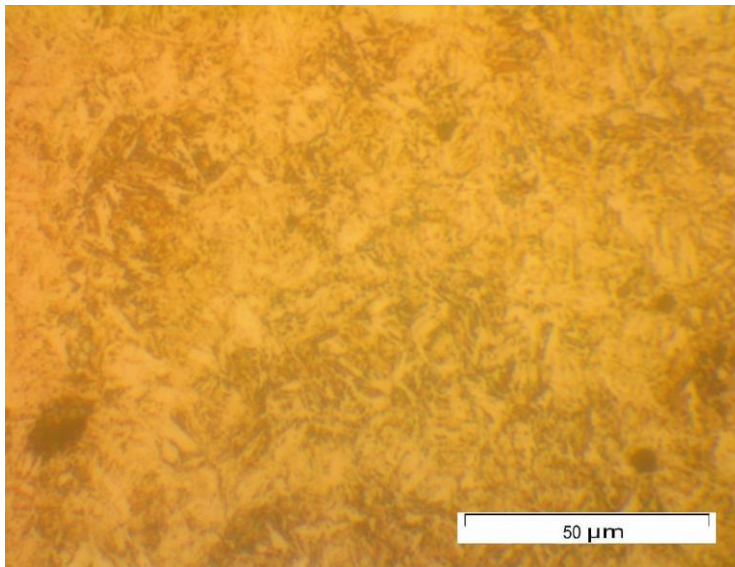
**Fuente:** Autores

Véase que todos los valores de los elementos definidos en la norma se encuentran dentro de los rangos establecidos, por tanto, el acero corresponde al AISI 4140.

### Caracterización microestructural

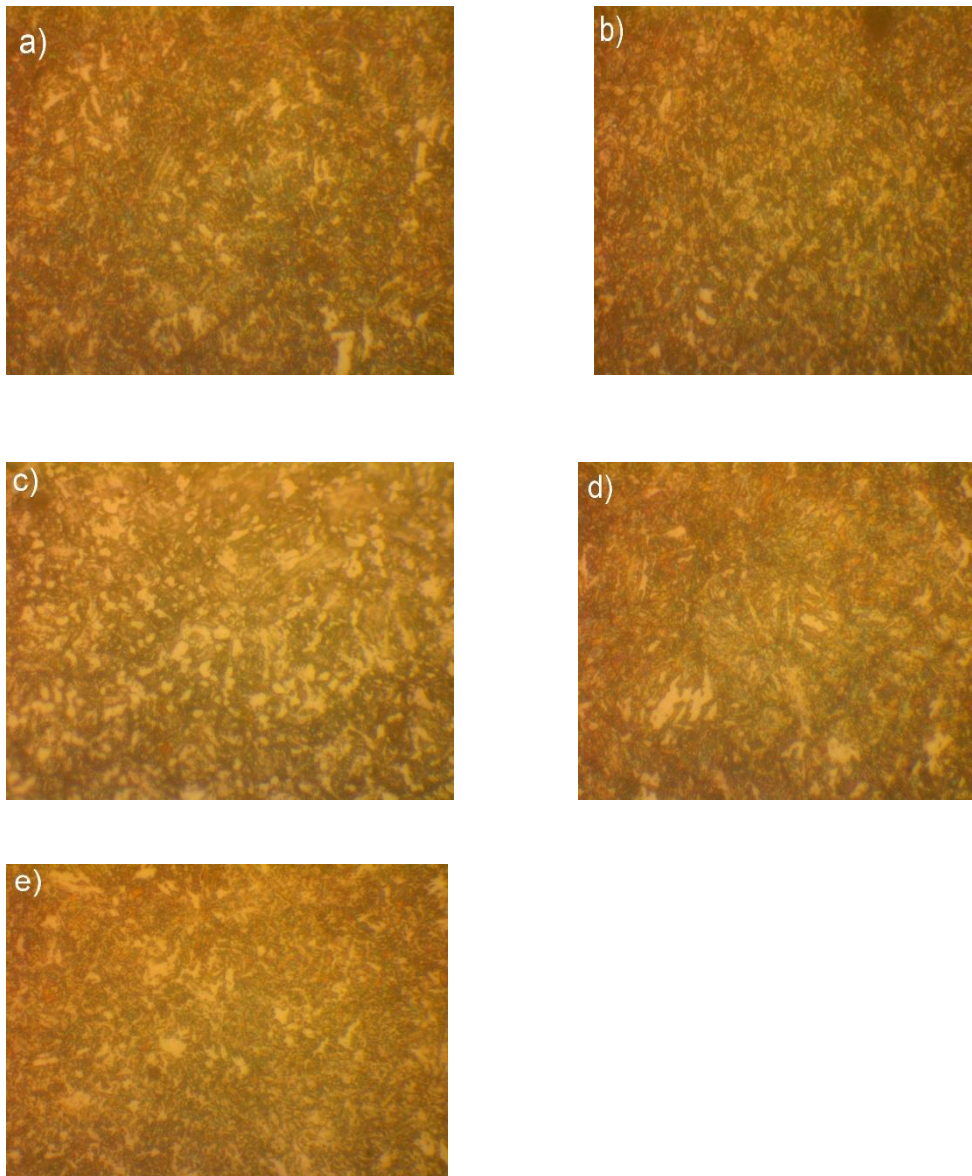
Véase que la microestructura está constituida por martensita revenida en forma de ripas, microestructura típica de un acero de medio carbono templado y revenido. No se observaron carburos en la microestructura. La dureza en estado de entrega fue de 33 RC.

La **Figura 13** muestra la microestructura del acero en estado de entrega.



**Figura 13.** Microestructura del acero AISI 4140 en estado de entrega. MO. 100X, Ataque Nital.

Por su parte en la **figura 14** se muestra la microestructura del acero para las diferentes temperaturas de revenido.

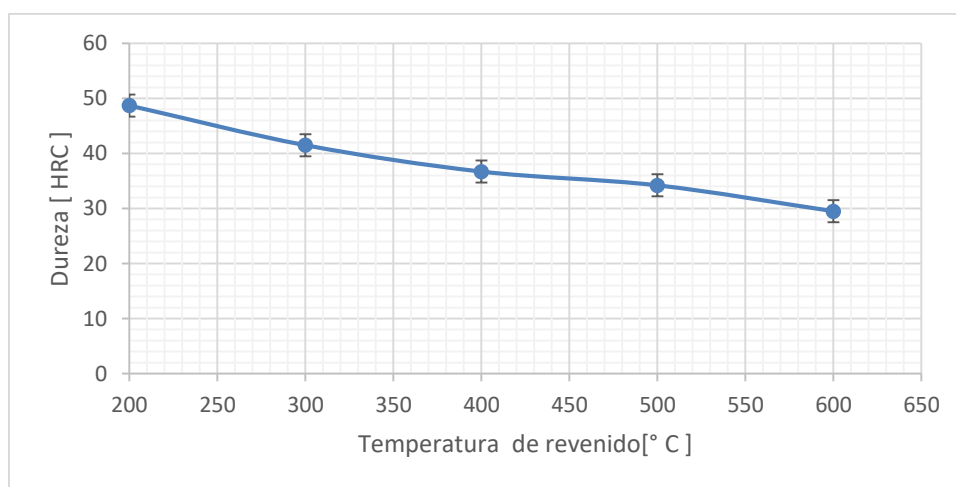


**Figura 14.** Microestructuras del acero AISI 4140 a diferentes temperaturas de revenido. a) 200°C, b) 300°C, c) 400°C, d) 500°C, e) 600°C. MO. 100X, Ataque Nital.



Se observa que la microestructura obtenida para todas las temperaturas de revenido está constituida por martensita revenida y carburos posiblemente de hierro tipo  $\text{Fe}_3\text{C}$ . De manera general, la martensita revenida se ve cada vez más difusa a medida que la temperatura de revenido aumenta, es decir, la martensita se va transformando cada vez más en Ferrita y Cementita, fases que son más estables. La principal diferencia entre las microestructuras radica en la forma y el tamaño de los carburos. Para las temperaturas de  $200^\circ\text{C}$  y  $500^\circ\text{C}$  son alargados, para  $300^\circ\text{C}$  y  $600^\circ\text{C}$  son achatados y para la temperatura de  $400^\circ\text{C}$  tiene forma arredondeada. Adicional a la martensita y a los carburos también es de esperar para este acero la presencia de Bainita, Ferrita y de Austenita retenida, sin embargo, no fue posible verificar la presencia de estas fases puesto que el máximo aumento alcanzado con el microscopio óptico utilizado de 100 veces fue insuficiente. En ninguna de las microestructuras se observaron defectos como grietas, precipitados, o segregación.

La Figura 15, muestra la variación de la dureza en función de la temperatura de revenido.



**Figura 15.** Variación de la dureza en función de la temperatura de revenido. **Fuente:** Autores.

### Propiedades mecánicas de acero AISI 4140.

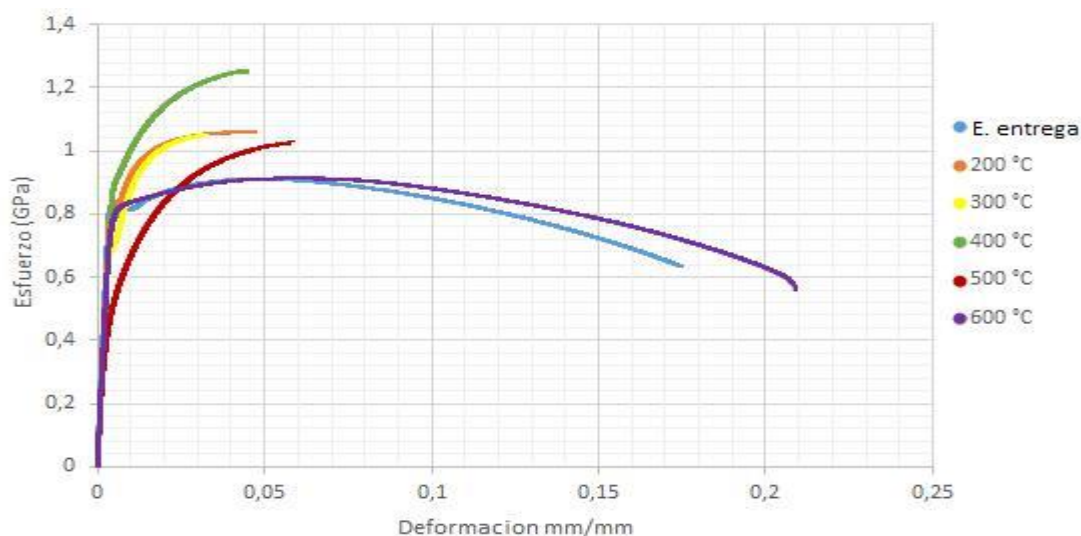
La Tabla 5, muestra todos los valores de las diferentes propiedades mecánicas calculadas en esta investigación a partir de las curvas de esfuerzo normal en función de la deformación unitaria para todas las temperaturas de revenido

**Tabla 5.** Propiedades mecánicas calculadas y teóricas.

Condición	Dureza	Teórico	Módulo elástico	Esf. de Fluencia	Esf. Último	Teórico	Resiliencia	Tenacidad	Elongación	Red. de área
	(HRC)	(HRC)	(Gpa)	(Gpa)	(Gpa)	(Gpa)	(kJ/mm <sup>3</sup> )	(kJ/mm <sup>3</sup> )	%	%
Estado de entrega	30.5		234.4	0.77	0.886		0.0024	0.2551	16.1	56.8
Revenido 200°C	48.7	56	236.2	0.8	1.016	1.93	0.0014	0.0958	2.1	20.3
Revenido 300°C	41.5	53	222.3	0.71	1.053	1.79	0.0016	0.06363	4.3	25.1
Revenido 400°C	36.7	48.5	228.7	0.713	1.14	1.59	0.0012	0.1042	7.2	28.9
Revenido 500°C	34.2	38-41.8	208.9	0.456	0.933	1.23-1.33	0.0017	0,111	11.1	54
Revenido 600°C	29.5	30-41.8	227.9	0.83	0.945	0.97-1.33	0.0025	0.2887	15.6	58.9

**Fuente:** Autores.

La figura 16, muestra las curvas de esfuerzo normal en función de la deformación unitaria del acero AISI 4140 en estado de entrega y para las diferentes temperaturas de revenido.

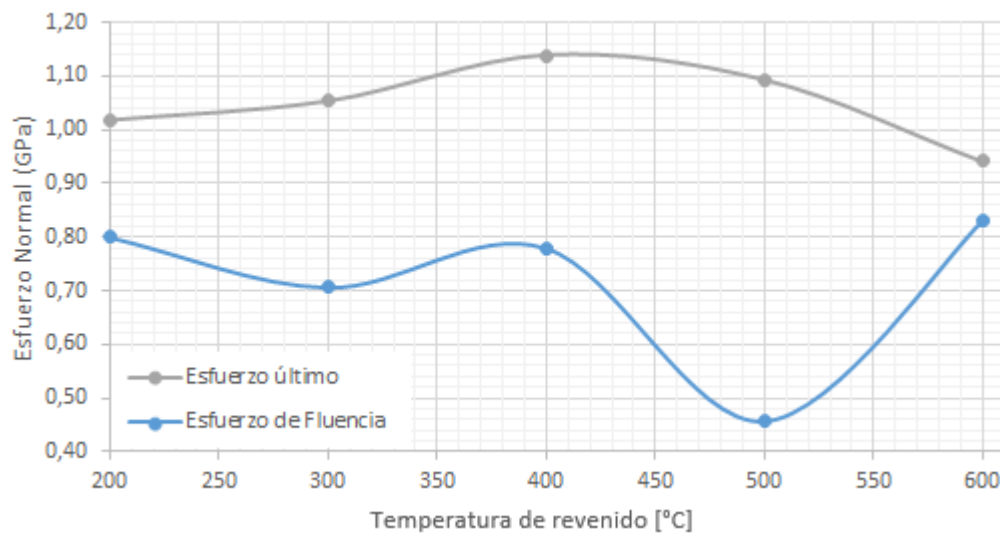


**Figura 16.** Curvas de esfuerzo normal en función de la deformación unitaria del acero AISI 4140 en estado de entrega y las diferentes temperaturas de revenido.

**Fuente:** Autores.

Se puede observar que la pendiente en la zona elástica para todas las curvas es la misma acorde a lo reportado en la literatura, confirmando que el módulo elástico es el mismo para todos los aceros, independiente de los elementos aleantes presentes, del tratamiento térmico realizado o del proceso de manufactura empleado. En adición, la temperatura de revenido modificó las otras propiedades mecánicas del acero. Se observa una fuerte disminución en la tenacidad para las temperaturas de revenido de 200 a 500°C en comparación con el estado de entrega y con la temperatura de revenido de 600°C, es decir, el revenido en esas temperaturas tuvo un efecto contrario y disminuyó la tenacidad del acero. Este fenómeno se conoce como fragilización por revenimiento. En algunos aceros durante el revenido a temperaturas entre 200 y 400°C se puede presentar una disminución en la tenacidad, hecho que puede ser atribuido a la

segregación de impurezas en los antiguos contornos de grano de la Austenita o a la formación de una red de Cementita que envuelve las agujas de la martensita KRAUS (2000). Adicionalmente, véase que, en comparación al estado de entrega, el revenido a 600°C aumentó ligeramente la tenacidad, sin embargo, no se observó una diferencia significativa en los valores de esfuerzo de fluencia y esfuerzo último entre estos dos tratamientos. De acuerdo a los resultados de dureza, a la microestructura y a los valores de propiedades mecánicas, se puede inferir que para el acero en el estado de entrega el revenido se realizó a una temperatura próxima a los 600°C. La Figura 17, muestra los valores del esfuerzo de fluencia y del esfuerzo último en función de la temperatura de revenido. Los valores de cada propiedad fueron calculados a partir de las curvas de esfuerzo normal en función de la deformación unitaria.



**Figura 17.** Esfuerzo de fluencia y esfuerzo último en función de la temperatura de revenido. **Fuente:** Autores.

El esfuerzo último aumenta desde 1,04 GPa correspondiente a 200°C hasta alcanzar el máximo valor de 1,14 GPa para 400°C, a partir de ese punto disminuye hasta alcanzar el mínimo valor de 0,95 GPa para 600°C. El esfuerzo de fluencia tuvo valores próximos a 0,8 GPa para las temperaturas de 200°C, 400°C y 600°C, y de 0,71 GPa para la

temperatura de 300°C, sin embargo, para la temperatura de 500°C presentó una caída significativa alcanzando el valor mínimo de 0,46 GPa. Al comparar estos resultados con los reportados en la literatura mostrados en la Tabla 5, se puede observar que, aunque en ambos casos el esfuerzo último disminuye con el aumento en la temperatura de revenido, hay grandes diferencias entre los valores. Esta diferencia es atribuida a los defectos creados durante el maquinado a las probetas de tensión que actuaron como concentradores de esfuerzo, forzando la falla de las probetas en el radio de curvatura impidiendo que alcanzaran mayores valores de esfuerzo de fluencia y normal.

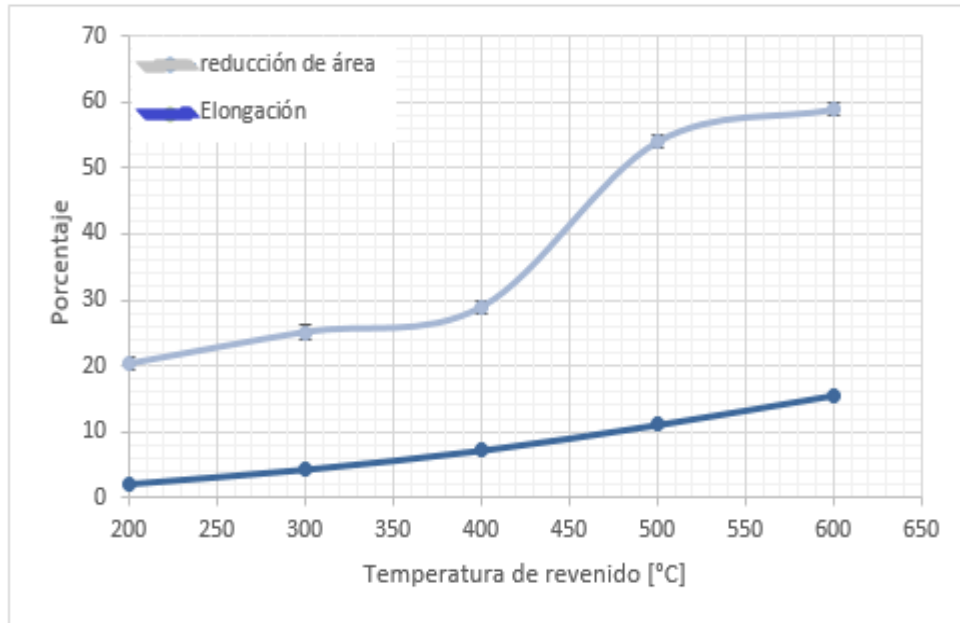
De acuerdo a la Tabla 6, los valores obtenidos para los esfuerzos de fluencia y esfuerzo último de las temperaturas de revenido de 500°C y 600°C, como también para el estado de entrega, notamos que sus respectivos valores sí están dentro de los valores esperados. Esto se debe a que, en los materiales dúctiles, la fluencia mitigará la concentración de esfuerzos, por lo que no se considera el efecto de la concentración de esfuerzos BADIOLA, (2004).

**Tabla 6.** Variación del Esfuerzo último en función de la temperatura de revenido.

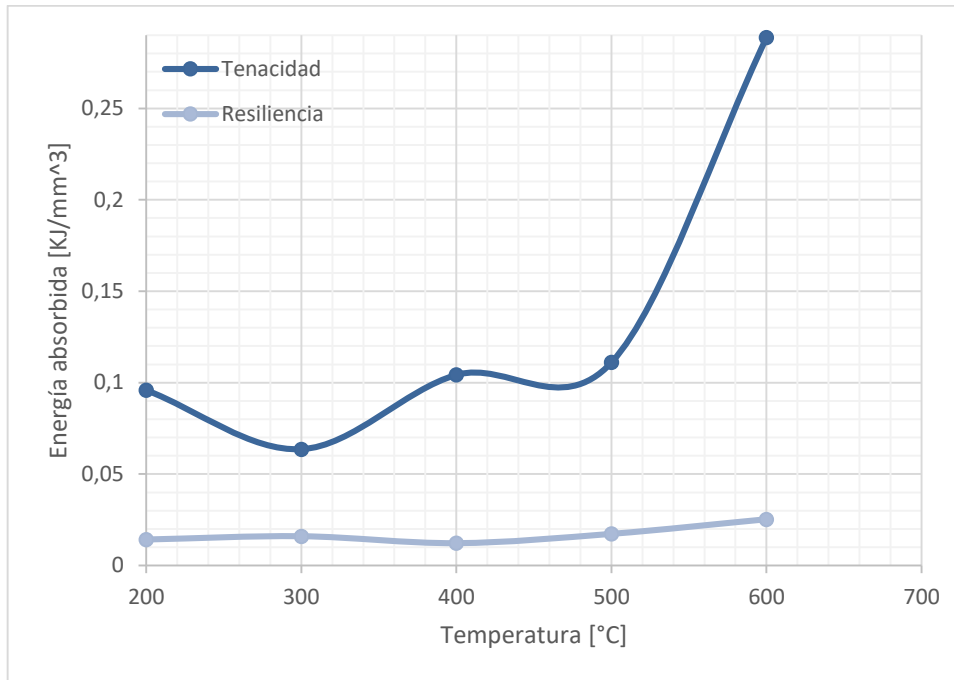
Temperatura [°C]	Sut [GPa]
200	1.93
300	1.79
400	1.59
500	1.23 – 1.33
600	0.97 – 1.33

**Fuente:** Propiedades mecánicas y caracterización microestructural de diferentes aceros dual-fase. Svoboda, h. (2008).

Las Figura 18 y Figura 19, muestran los porcentajes de elongación y de reducción de área y la resiliencia y tenacidad en función de la temperatura de revenido. Los valores de cada propiedad fueron calculados a partir de las curvas de esfuerzo normal en función de la deformación unitaria.



**Figura 18.** Porcentajes de elongación y de reducción de área en función de la temperatura de revenido.



**Figura 19.** Resiliencia y tenacidad en función de la temperatura de revenido.

**Fuente:** Autores.

Se observa que tanto el porcentaje de elongación como la reducción de área aumentan con el aumento en la temperatura de revenido como esperado, sin embargo, para las temperaturas de 500°C y 600°C el aumento en la reducción de área fue casi dos veces el valor mostrado a 400°C. Este comportamiento indica que la ductilidad del acero se incrementa con el aumento en la temperatura de revenido. Por otro los valores de tenacidad estuvieron próximos a 0,1 kJ/mm<sup>3</sup> para las temperaturas de 200°C, 400°C y 500°C. Véase también que el mínimo valor de tenacidad de 0,06 kJ/mm<sup>3</sup> se obtuvo a 300°C, resultado atribuido a la fragilización por revenimiento como se explicó anteriormente. No hubo diferencia significativa entre los valores de resiliencia, los cuales estuvieron próximos a 0,1 KJ/mm<sup>3</sup> para todas las temperaturas de revenido.



La Figura 20, muestra las fracturas producidas en las probetas durante los ensayos de tensión.



**Figura 20.** Tipos de falla producidos en las probetas durante los ensayos de tensión, a) Fractura dúctil b) fractura frágil.

Se puede observar la falla cono-copa típica de materiales con respuesta dúctil y la falla frágil con poca deformación plástica. Los materiales que soportan una gran deformación plástica sin fracturas son dúctiles, y los que se fracturan con poca deformación plástica son frágiles. Dúctil y frágil son términos relativos; en forma inherente, los metales y los polímeros son más dúctiles que las cerámicas, pero dada cierta clase de materiales, la ductilidad puede variar mucho.

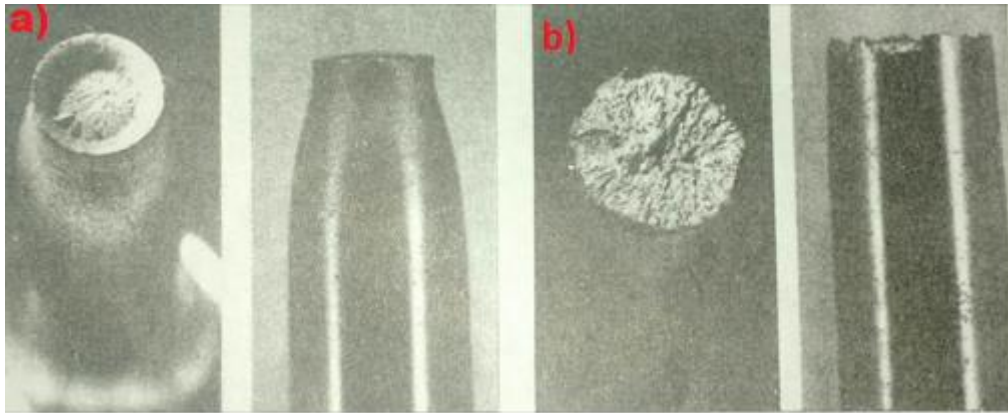
Como se ve en la Figura 21, la fractura dúctil en los metales se nuclea por lo general en inhomogeneidades, como, por ejemplo, en las inclusiones. Va precedida por gran deformación localizada en la región del cuello del espécimen.

La fractura dúctil requiere una cantidad importante de energía, porque hay que efectuar trabajo para deformar plásticamente al material, en la región del cuello. En contraste, si no se dispone de mecanismos de absorción de energía puede presentarse la fractura frágil. En la Figura 22, se ven ejemplos de fracturas dúctil y frágil, obtenidos durante pruebas de tensión de metales.



**Figura 21.** Iniciación de la fractura dúctil en torno a inclusiones en la región estrangulada del cobre.

**Fuente:** J.I.Bluhm y R.J.Morrissey, international conference fractures, 1995, Sendai, Japón, vol.D-II, p. 73.



**Figura 22.** a) aspecto macroscópico de una falla dúctil por tensión (véase el aspecto característico copa y cono) b) aspecto macroscópico de una falla frágil por tensión.

**Fuente:** Metals handbook, vol. 11, Failure Analysis and prevention, 9<sup>a</sup>. Ed; 1986, ASM International, Materials Park

## 6 CONCLUSIONES

Los resultados de espectroscopia de emisión óptica confirmaron que la composición química del acero utilizado en esta investigación corresponde al acero AISI 4140.

La microestructura en estado de entrega está constituida por martensita revenida en forma de ripas, microestructura típica de un acero de medio carbono templado y revenido. No se observaron carburos en la microestructura. La dureza en estado de entrega fue de 33 RC. Acorde a los resultados de microestructura y propiedades mecánicas, se puede inferir que en el estado de entrega el revenido se hizo a una temperatura próxima a los 600°C.

La microestructura obtenida para las temperaturas de revenido está constituida por martensita revenida y carburos posiblemente de hierro tipo  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Con el aumento en la temperatura de revenido la martensita se va transformando cada vez más en ferrita y Cementita, fases que son más estables. La dureza disminuyó con el aumento de la temperatura de revenido, el máximo valor fue 48,7 RC para la temperatura de 200°C y el mínimo fue de 29,5 RC para la temperatura de 600°C.

El revenido modifico fuertemente las propiedades mecánicas del acero AISI 4140. La tenacidad disminuyo notablemente para las temperaturas de revenido de 300°C y 500°C en comparación con el estado de entrega, el máximo valor de tenacidad de 0.30 KJ/mm<sup>3</sup> se tuvo para la temperatura de revenido 600°C.

El esfuerzo último en función de la temperatura de revenido estuvo entre 0,95 GPa y 1,14 GPa. El esfuerzo de fluencia tuvo valores próximos a 0,86 GPa siendo diferente para la temperatura de 500°C que tuvo un valor de 0,46 GPa.

A medida que aumentó la temperatura de revenido aumentó el porcentaje de reducción de área y el porcentaje de elongación.

No hubo diferencia significativa entre los valores de resiliencia los cuales estuvieron próximos a  $0,1 \text{ KJ/mm}^3$  para todas las temperaturas de revenido.

El tipo de falla en las probetas de estado de entrega y las de la temperatura de revenido de 600°C presentaron la falla tipo cono-copa típica para materiales dúctiles. Las probetas de las temperaturas restantes tuvieron una fractura frágil con poca deformación plástica.

Se verificó que el tratamiento térmico de revenido del acero se realiza para obtener valores específicos en propiedades mecánicas.

## **7 RECOMENDACIONES**

- ✓ Realizar medidas de micro dureza en los carburos de hierro.
- ✓ Utilizar microscopia electrónica de barrido y difracción de rayos X para verificar la presencia de otras fases o constituyentes como ferrita, Bainita y Austenita retenida.
- ✓ Utilizar torno CNC para la fabricación de las probetas y así evitar concentradores de esfuerzos producto de un mal maquinado.

## 8 BIBLIOGRAFIA

- MACHADO, I. 2002. Tratamentos trmicos e de superficie. Prof. Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo. Depto. de Engenharia Mecatrónica e de Sistemas Mecanicos PMR.
- ASKELAND, D. 1998. Ciencia e ingeniería de los materiales. International Thomson Editores
- CURSOS/Metalurgia/Apuntes/cap6, disponible en <http://www.ing.puc.cl/icm/>
- SMITH, F. 1998. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniera de Materiales. México. 3 ed. McGraw Hill.
- VALENCIA, A. 1992. Tecnología del Tratamiento Térmico de los Metales. Medellín. 2 ed. Ed. Universidad de Antioquia.
- SIAS, A. 2013. Desarrollo de propiedades mecánicas de un nuevo acero nicromo para la fabricación de anillos para componentes mecánicos. tesis de pregrado. Universidad autónoma de nuevo león. México.
- Lorusso, H., Burgueño, A., Svoboda, H. 2008. Propiedades mecánicas y caracterización microestructural de diferentes aceros dual-fase, universidad de Buenos Aires.
- GROOVER, M. 1997. Fundamentos de manufactura moderna. materiales, procesos y sistemas. Pearson, prentice hall, México.
- GARCÍA L, ALBÁN, M. 2011. Análisis y selección de herramientas de corte, geometría y composición para el mecanizado del acero AISI 4340, basado en los parámetros de la ecuación de Taylor y los criterios de desgaste del flanco y caracterización. tesis de pregrado. escuela superior politécnica del litoral. ecuador

- international. (1990) asm handbook vol. 1: properties and selection: irons, steels and asm high-performance alloys, 10th ed., asm international, usa.
- Moore, H. y Kibbey, D. 1987. Materiales y procesos de Fabricación. Editorial Limusa, México.
- Chiaverini, V. 2008. Aços e ferros fundidos. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais,. 599p
- Callister, W. 2006. Ciencia e ingeniería de los materiales: 5. ed. Rio. 589p.
- ASM Handbook, 1995. Mechanical Testing. v. 8. ASM International.
- ASM Handbook. 1995. Mechanical Testing. Metals Park, Ohio: American Society for Metals,. v.8.
- Krauss, G. 1999. Martensite in steel: strength and structure. Materials Science and Engineering A, v. 273–275, p. 40-57.
- Krauss, G. 2000. Steels: heat treatment and processing principles. 6. ed. Ohio: ASM International, 497p
- Totten, G. 2006. Steel heat treatment: metallurgy and technologies. Boca Raton: CRC Press, 820p.
- Teichert, E. 1962. Siderurgia. metalografía y tratamiento térmico del acero. Porto Alegre: Globo, 3v.
- Totik, Y. et al. 2003. The effects of induction hardening on wear properties of AISI 4140 steel in dry sliding conditions. Materials and Design, v. 24, n. 1, p. 25–30,.
- Badiola, V. 2004. Diseño de máquinas I, ingeniería mecánica y computacional. International Thomson Editores.
- Jones, D.; Ashby, M. 2007. Engenharia de materiais. São Paulo: Campus,. 2v
- Bhadeshia, H., Honeycombe, R. 2006. Steels: microstructure and properties. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.



- Valencia, A. 1992. Tecnología de los tratamientos térmicos. Universidad de Antioquia.